

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра Телекомунікаційних систем**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Леонід УРИВСЬКИЙ

« ____ » _____ 20__ р.

**Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка
на тему: «Управління ресурсами та якістю в мережах LTE»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ТС-61
Ловейкін ДанилоЮрійович

Керівник:

доцент кафедри ТС,
доц. Носков Вячеслав Іванович

Рецензент:

незалежний експерт з телекомунікацій
к.т.н., Вахрушев Володимир Платонович

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра Телекомунікаційних систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка

Програма професійного спрямування (спеціалізація) – «Телекомунікаційні системи та мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Леонід УРИВСЬКИЙ

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Ловейкіну Данилі Юрійовичу

1. Тема роботи «Управління ресурсами та якістю в мережах LTE», керівник роботи Носков Вячеслав Іванович, доцент, затверджені наказом по університету від 30 березня 2020 р. № 924-с.
2. Термін подання студентом роботи 12 червня 2020 року.
3. Вихідні дані до роботи: Інформаційні матеріали щодо систем мобільного зв'язку LTE. Структурований план порядку розробки матеріалів дипломної роботи.
4. Зміст роботи: Обґрунтувати актуальність теми. Розглянути вдосконалену архітектуру мережі мобільного зв'язку LTE, яка базується на принципах самоорганізації та утворює, таким чином, мережу self-organized network (SON). Детально розглянути механізми управління ресурсами мережі та

забезпечення якості обслуговування (QoS) при наданні різноманітних телекомунікаційних послуг.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): 1) Тема та цілі дипломної роботи; 2) Архітектура мережі LTE; 3) Управління ресурсами мережі LTE; 4) Самооптимізація мереж LTE; 5) Оцінка якості послуг мережі LTE; 6) Основні процедури щодо підвищення якості мереж LTE; 7) Висновки по роботі

6. Дата видачі завдання: 13 квітня 2020 року

Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання дипломної роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|--------------------------------|----------|
| 1 | Архітектура мережі LTE, призначення та функції її елементів. | 18.04.2020 | Виконав |
| 2 | Концептуальні підходи до управління ресурсами мережі | 26.04.2020 | Виконав |
| 3 | Самоорганізація та управління частотними ресурсами в мережі LTE: алгоритм самоорганізації мережі; самооптимізація та балансування навантаження; принципи управління частотним ресурсом. | 10.05.2020 | Виконав |
| 4 | Управління якістю послуг в мережах LTE: Критерії якості для різних категорій послуг; огляд розповсюджених методів забезпечення різних категорій | 25.05.2020 | Виконав |

| | | | |
|---|--|------------|---------|
| | телекомунікаційних послуг; технічні принципи забезпечення якості послуг в мережах LTE. | | |
| 5 | Вступ, Висновки | 02.06.2020 | Виконав |
| 6 | Чистовий варіант дипломної роботи, плакати | 10.06.2020 | Виконав |

Студент

Данило ЛОВЕЙКІН

Керівник роботи

Вячеслав НОСКОВ

РЕФЕРАТ

Текстова частина дипломної роботи 70 с., 29 рис., 11 табл., 14 джерел.

Робота присвячена темі забезпечення якості в мережі LTE. Стрімке розширення абонентської бази в мережі LTE вимагає постійної інтеграції нових вузлів в її структуру, для забезпечення абонентам необхідної якості послуг. Однак, на якість послуг впливають різноманітні завади, які знижують загальну ефективність мережі, що можуть бути викликані як зовнішніми, так і внутрішніми чинниками.

Мета роботи – огляд методів контролю за якісними показниками мобільної мережі, а також формування рекомендацій щодо виявлення та знешкодження різноманітних завад в мережі LTE.

В даній роботі розглядаються типові проблеми, які притаманні мережі четвертого покоління. Забезпечення високого рівня якості мережі вимагає максимального ефективного використання її ресурсів, що послугувало появі в мережах LTE різноманітних систем контролю, в тому числі і автоматичних систем конфігурації мережі. Подібні системи не вирішують всіх проблем для забезпечення належної якості мережі, але своїм функціоналом суттєво полегшують керування і оптимізацію мобільної мережі.

АРХІТЕКТУРА МЕРЕЖ LTE, УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ МЕРЕЖІ LTE,
САМООПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖ LTE, ОЦІНКА ЯКОСТІ ПОСЛУГ МЕРЕЖІ
LTE, ОСНОВНІ ПРОЦЕДУРИ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ МЕРЕЖ
LTE

ABSTRACT

Text part of the thesis: 70 p., 29 fig., 11 Table., 14 sources.

This thesis is dedicated to ensuring service quality in LTE networks. Rapid expansion of the subscriber base of LTE networks requires constant addition and integration of new nodes to ensure high quality of service for end customers. However, service quality is influenced by various problems, which can be caused by internal and external factors, and reduce overall effectiveness of the network.

The goal of this thesis — overview of techniques and methods that can be used to create the solutions for detecting and neutralizing various problems in LTE networks, based on various network quality indicators.

This thesis describes problems that are typical for this 4th generation network. Ensuring high service quality requires highly effective use of network resources, this led to development of various control systems in LTE networks, including automatic network configuration systems. Such systems cannot, by themselves, greatly influence service quality in the network, however they significantly ease the process of optimization and control.

LTE NETWORK ARCHITECTURE, LTE NETWORK RESOURCE
MANAGEMENT, SELF-OPTIMIZATION OF LTE NETWORKS,
EVALUATION OF THE QUALITY OF LTE NETWORK SERVICES, BASIC
PROCEDURES FOR IMPROVING THE QUALITY OF LTE NETWORKS

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ..... | 8 |
| ВСТУП | 10 |
| 1 АРХІТЕКТУРА МЕРЕЖІ LTE..... | 11 |
| 1.1 Загальна структура мереж LTE та її відмінності від мереж попереднього покоління | 11 |
| 1.2 Підходи до управління ресурсами мережі | 15 |
| 1.3 Висновки до розділу 1 | 22 |
| 2 САМООПТИМІЗАЦІЯ ТА УПРАВЛІННЯ ЧАСТОТНИМИ РЕСУРСАМИ LTE | 23 |
| 2.1 Алгоритм самоконфігурації мережі | 23 |
| 2.2 Висновки до розділу 2 | 37 |
| 3 ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ МЕРЕЖІ LTE | 39 |
| 3.1 Критерії якості для різних видів послуг в мережі LTE | 39 |
| 3.2 Показники КРІ..... | 42 |
| 3.3 Оцінка якості мережі | 45 |
| 3.4 Висновки до розділу 3 | 46 |
| 4 УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПОСЛУГ В МЕРЕЖАХ LTE | 47 |
| 4.1 Забезпечення якості послуг..... | 47 |
| 4.2 Технологічні принципи забезпечення якості послуг, що передаються в мережах LTE..... | 50 |
| 4.3 Висновку до розділу 4 | 67 |
| ВИСНОВКИ..... | 68 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ | 70 |

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

| | |
|---------|--|
| LTE | Long-Term Evolution |
| ETSI | Європейський Інститут Стандартів Телекомунікацій |
| HSPA | High Speed Packet Access |
| UMTS | Universal Mobile Telecommunications System |
| 3GPP | The 3rd Generation Partnership Project |
| OFDM | Orthogonal Frequency-Division Multiplexing |
| QAM | Quadrature Amplitude Modulation |
| SAE | System Architecture Evolution |
| EPS | Evolved Packet System |
| E-UTRAN | Evolved UMTS Terrestrial Radio Access |
| UE | User Equipment |
| MME | Mobility Management Entity |
| SGW | Serving Gateway |
| PGW | Public data Gateway |
| HSS | Home Subscribe Server |
| PCRF | Policy and Charging Rules Function |
| QoS | Quality of service |
| eNB | Evolved-NodeB |
| FDD | Frequency-division duplexing |
| TDD | Time Division Duplex |
| MCS | Modulation and Coding Scheme |
| TBS | Transport Block Size |
| CP | Cyclic Prefix |
| CQI | Chanel Quality Indicator |
| SON | Self-organized network - |
| OAM | Operation, Administration and Maintenance Center |
| BCCH | Broadcast control channel |
| MLB | Mobility Load Balancing |

| | |
|---------|--------------------------------------|
| PRB | Physical Resources Block |
| FDPS | Frequency Domian Packet Scheduling |
| ICIC | Inter-Cell Interference Control |
| RSRP | Reference Signal Received Power |
| RSRQ | Reference Signal Received Quality |
| SINR | Signal to Interference + Noise Ratio |
| QCI | QoS Class Identifier |
| GBR | Guaranteed Bit Rate |
| Non-GBR | Not Guaranteed Bit Rate |
| PERL | Packet Error Loss Rate |
| QoE | Quality of Experience |
| KPI | Key Performance Indicators |
| KQI | Key Quality Indicator |
| RET | Remote Electrical Tilt |

ВСТУП

З кожним роком об'єм трафіку, який обслуговується мобільною мережею, поступово зростає. Це обумовлено збільшенням активних користувачів в мережі та все більшим використанням додатків, що транслюють відеоконтент. Для того, щоб відповідати вимогам користувачів і надавати якісні послуги зв'язку, мережа оператора мобільного зв'язку повинна постійно розширюватися, збільшуючи свою ємність. Однак інтеграція нових елементів в мережі є досить складною та економічно витратною процедурою, і до того ж, займає багато часу, тому оператори мобільного зв'язку зацікавлені у максимальному ефективному використанні ресурсів своєї мережі. Робота присвячена забезпеченню якості мережі LTE.

В першому розділі розглядаються основні відмінності мережі LTE від минулих поколінь – для мережі четвертого покоління було впроваджено нову архітектуру, що дозволило перейти на принцип all ip network, дотримуючись критеріїв якості на кожному відрізку мережі.

У другому розділі розглядаються автоматичні системи оптимізації та конфігурації мережі. Використання таких систем допомагає значною мірою спростити експлуатацію мережі та підвищити її якісні показники.

У третьому розділі представлені основні принципи оцінки якості послуг. На оцінку якості послуг з боку користувача можуть впливати як об'єктивні, так і суб'єктивні причини, наприклад, минулий досвід користування мережею. Для оцінки якості роботи самої мережі вводять спеціальні показники, які розраховуються за формулами. Такі показники зазвичай характеризують саму продуктивність роботи мережі відповідно до навантаження, що обслуговується.

Четвертий розділ являє собою останній розділ, у якому були розглянуті типові проблеми, які виникають під час експлуатації мережі, та способи їх вирішення або корегування. Використовуючи методи, які представлені в четвертому розділі, можливо домогтися забезпечення якості в мережі LTE.

1 АРХІТЕКТУРА МЕРЕЖІ LTE

1.1 Загальна структура мереж LTE та її відмінності від мереж попереднього покоління

Попередній стандарт стільникового зв'язку UMTS, що був розроблений Європейським Інститутом Стандартів Телекомунікацій ETSI для впровадження 3G у Європі, міг забезпечити різні мультимедійні послуги (зі швидкістю до 42 Мбіт/с – по лінії вниз і до 11,5 Мбіт/с – по лінії вгору), використовуючи технологію HSPA +. Розробкою нового стандарту, що є вдосконаленням стандарту UMTS, займалася організація 3GPP.

Основною відмінністю стандарту LTE від стандартів минулих поколінь полягає у використанні методу ортогонального частотного розділення OFDM та рознесеного прийому/передачі MIMO. Сюди ж можна віднести збільшення максимальної смуги частот до 20 МГц з можливістю гнучкого використання смуги від 1,4 МГц до 20 МГц. Збільшена смуга частот дозволила мереж LTE отримати більшу доступність, ємність і високу швидкість передачі інформації в порівнянні з технологією UMTS.

Головні вимоги до стандарту LTE були:

- Пропускна здатність до 1 Гбіт/с зі спектральною ефективністю до 30 біт/Гц;
- Висока сумісність і гнучкість;
- Низькі затримки в роботі системи, в межах 10 мс;
- Висока енергоефективність;
- Високий рівень безпеки системи;
- Надання послуг мобільного зв'язку з дотримання високої якості;

Всередині мережі LTE на фізичному рівні застосований метод мультиплексування OFDM, в якому ортогональні піднесучі розташовуються близько один до одного з низькою символною швидкістю. Сам потік вихідних даних розділяється на декілька паралельних потоків, кожен з яких є ортогональним один до одного. Це допомагає виключити взаємні завади, які

можуть виникати між потоками, та дозволяє розташовувати піднесучі максимально щільно в частотному спектрі. Модуляція піднесучих відбувається за стандартною схемою модуляції, наприклад QAM. До основних переваг використання технології OFDM можна віднести її можливість протистояти складним радіоумовам під час роботи в каналі, які викликані різними перешкодами та загасанням сигналу в області високих частот. До істотних недоліків даної технології можна віднести її обмежену спектральну характеристику при використанні широкої смуги частот і надзвичайну чутливість до зсуву частоти, викликаного ефектом Допплера. Допплерівське зміщення частоти відбувається під час руху об'єкта зв'язку, значно знижуючи ефективність передачі й прийому, що надзвичайно актуально для автомагістралей та інших швидко рухомих об'єктів.

Мережа LTE використовує нову системну архітектуру SAE, яка була розроблена консорціумом 3GPP для LTE. Мережа функціонує за принципом All IP Network, тобто повністю побудована на IP мережі, що виключає необхідність в комутації каналів під час голосових дзвінків. Так само спрощена архітектура знижує матеріальні витрати, у випадку, якщо необхідно збільшити пропускну здатність системи.

Архітектуру SAE можна розділити на дві частини, виділивши систему радіо доступу E-UTRAN та мережі оператора EPS.

Структурна схема мережі представлена на рисунку 1.1

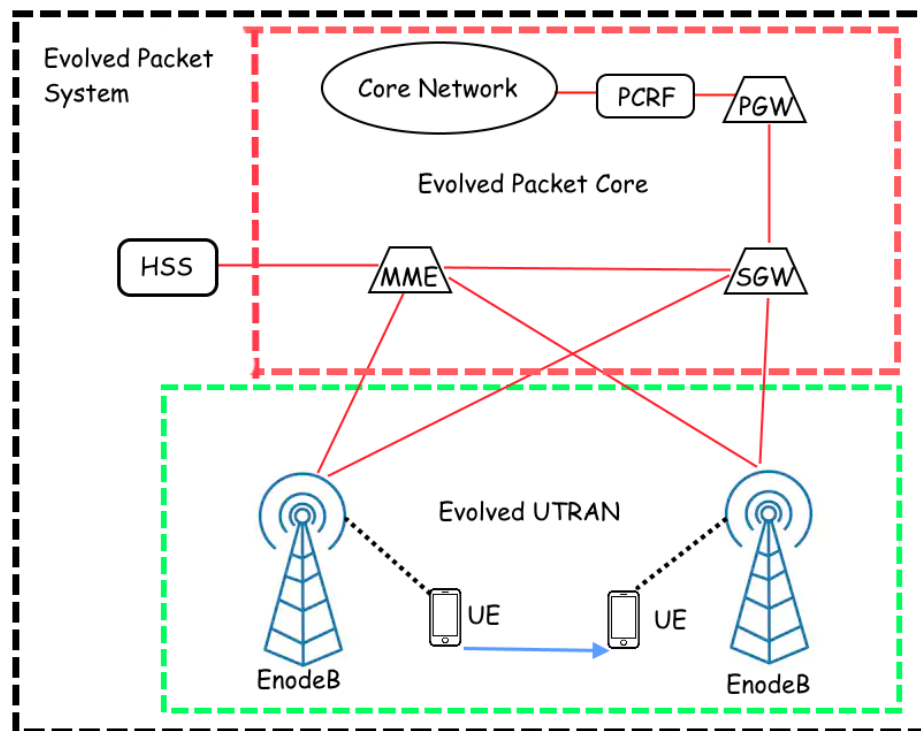


Рисунок 1.1 – Структура мережі LTE

Розглянемо компоненти мережі EPS:

- MME – вузол мережі, через який проходить сигнальний трафік від ядра мережі до UE. Через цей вузол відбувається управління сесіями UE під час переміщення абонента, а також при його знаходженні в роумінгу;
- SGW– виконує маршрутизацію трафіку і пакетну комутацію. Відправляє повідомлення PCRF про початок з'єднання і про його завершення;
- PGW – виділяє IP адреси для UE, здійснює фільтрацію IP пакетів, що надходять, на різні потоки з конкретним набором QoS;
- HSS – основна база даних про абонентів в мережі LTE, служить для зберігання призначених для користувача номерів та адресної інформації, інформацію про профілі абонента і його зразкове місце розташування. Також HSS генерує дані, які необхідні для шифрування та аутентифікації;
- PCRF - вузол мережі, який відстежує переданий трафік і забезпечує тарифікацію. За своєю суттю представляє сервер, який оцінює доступні ресурси мережі й відправляє в PGW команди, які задають вимоги до якості послуг;

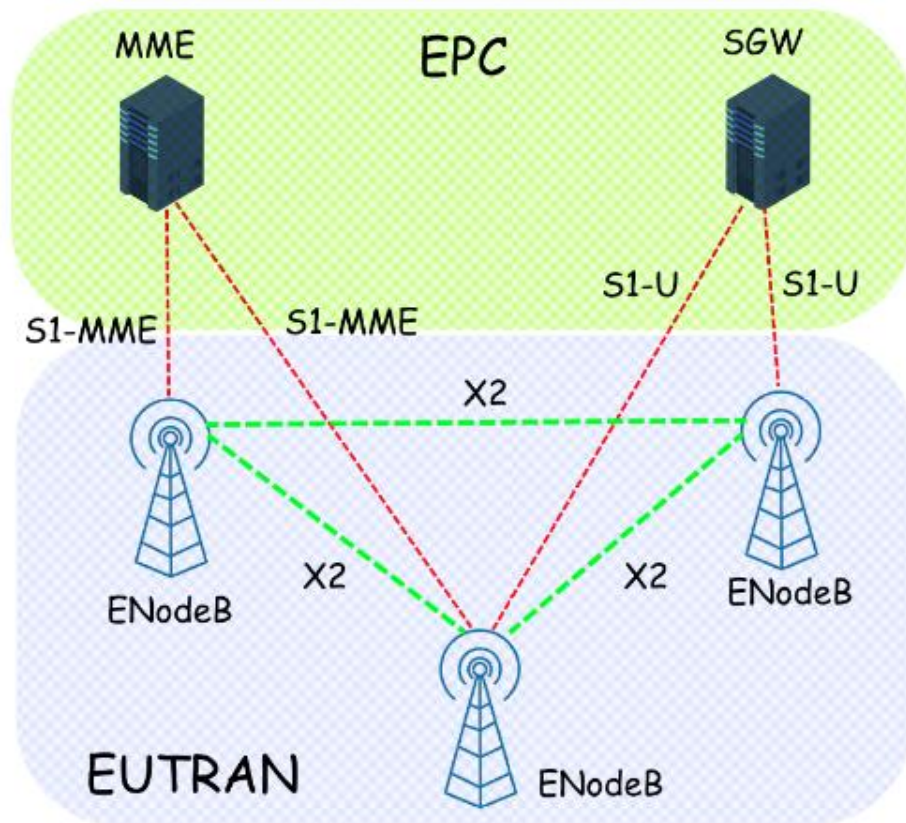


Рисунок 1.2 – Архітектура E-UTRAN

Архітектура E-UTRAN базується на побудові мережі радіодоступу з використанням нових базових станцій eNB, де взаємодія між базовими станціями відбувається за допомогою інтерфейсу X2, а підключення до EPC (рис. 1.2) відбувається за допомогою інтерфейсу S1. При цьому, eNB може мати з'єднання з декількома SGW. eNB виконують функцію базових станцій і контролерів мережі минулих поколінь:

- Передають трафік і забезпечують синхронізацію радіоканалу;
- Контролюють рівень перешкод в стільнику;
- Забезпечують наскрізний канал трафіку до SGW, його шифрування й цілісність даних під час передачі;
- Проводять стиснення заголовків IP пакетів;
- Здійснюють підтримку послуг мультимедійного мовлення;
- Здійснюють вибір MME й організовують сигнальний обмін з ним.

Мережеві інтерфейси E-UTRAN використовують відкриті стандарти, завдяки чому вузли eNB від різних постачальників можуть функціонувати між собою в рамках однієї мережі – використовуючи інтерфейс X2, елементи EPS та з'єднання S1, як і було зазначено вище. Взаємодія з вузлом управління мобільністю MME відбувається за допомогою інтерфейсу S1-MME, а в призначеній для користувача площині використовують тунельний протокол на рівні L2.

1.2 Підходи до управління ресурсами мережі

Для синхронізації E-UTRAN використовують кадри з тривалістю $T_s = \frac{1}{1500 \cdot 2048}$ [с], а передача даних по радіоканалу відбувається кадрами довжиною в 10 мс, що становить 307200 тактових одиниць T_s . Існують дві структури кадрів: при роботі з частотним дуплексом FDD і при роботі з часовим дуплексом TDD.

Сам кадр складається з 20-ти тимчасових слотів, з номерами від 0 до 19. Кожен зі слотів має довжину в 15360 T_s , що дорівнює 0,5 мс (рис 1.3). Два слоти, що розташовуються послідовно, складають один субкадр. Загальна кількість субкадрів складає 10 – з порядковими номерами від 0 до 9. На рисунку 5 зображена структура кадру при частотному дуплексі. Передача вгору і вниз розділена двома окремими кадрами (рис. 1.4).

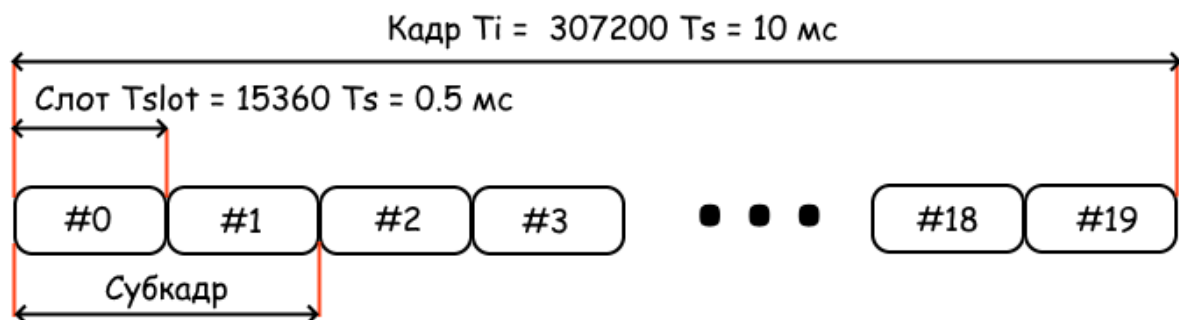


Рисунок 1.3 – Структура кадру FDD

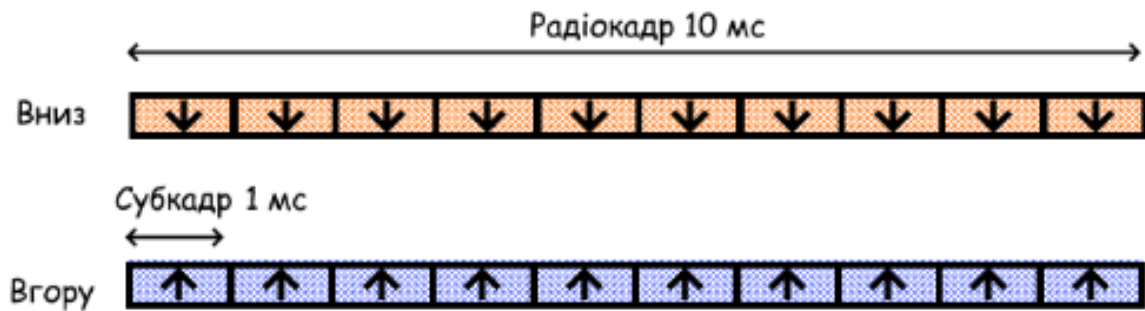


Рисунок 1.4 – Передача вгору та вниз

Розглянемо тепер структуру кадру при тимчасовому дуплексі. Тривалість кадру залишилася та ж – 10 мс, і в ньому міститься, як і раніше, 10 субкадрів з довжиною в 1 [мс]. Але, на відміну від FDD, в деяких субкадрах TDD йде передача вниз (D), в інших вгору (U). Існує ще третій вид субкадрів (S), які складаються з таких полів: DwPTS – поля передачі вниз, UpPTS – поля передачі вгору, захищений інтервал (GP) (рис. 1.5).

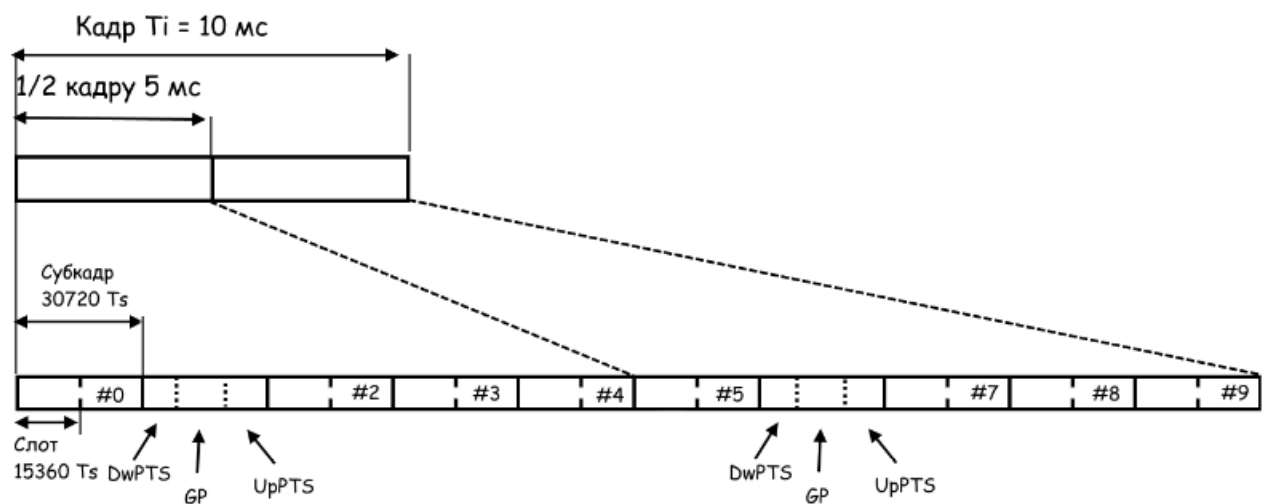


Рисунок 1.5 – Структура кадру TDD

Можливі сім конфігурацій кадру при часовому дуплексі:

Таблиця 1.1 – Конфігурації кадру TDD

| Конфігурація вгору-вниз | Періодичність вгору-вниз | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-----------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 0 | 5 мс | D | S | U | U | U | D | S | U | U | U |
| 1 | 5 мс | D | S | U | U | D | D | S | U | U | D |
| 2 | 5 мс | D | S | U | D | D | D | S | U | D | D |
| 3 | 10 мс | D | S | U | U | U | D | D | D | D | D |
| 4 | 10 мс | D | S | U | U | D | D | D | D | D | D |
| 5 | 10 мс | D | S | U | D | D | D | D | D | D | D |
| 6 | 5 мс | D | S | U | U | U | D | S | U | U | D |

У каналі стандарту E-UTRA відстань між піднесучими OFDM становить $\Delta F = 15$ кГц, отже довжина символу OFDM становить $\frac{1}{15000} = 66,7$ мкс. У кожному слоті (половині субкадру) передають 7 OFDM символів, в залежності від значення паузи між символами. Дана пауза називається циклічним префіксом CP, тривалість якого становить $160 T_s = 5,2$ мкс перед першим символом і $144 T_s = 4,7$ мкс перед іншими символами. Існує варіант конфігурації, який складається з 6 OFDM символів, в якому тривалість префікса дорівнює $512 T_s$ або 16,7 мкс. Відповідно від використовуваного варіанта циклічного префікса, можливі 9 конфігурацій спеціальних субкадрів S при тимчасовому дуплексі (табл. 1.2).

Канальний ресурс розділений на ресурсні блоки. Кожен такий блок складається з 12 послідовних піднесучих, займає смугу 180 кГц з 6 або 7 OFDM-символів з часовим інтервалом 0,5 мс. Ресурсним елементом називають OFDM символи, які можна точно ідентифікувати в ресурсному блоці послідовно частоти піднесучих (вісь частоти) і за номером символу

(часова вісь). Всього в кожному нормальному блоці $12 \times 7 = 72$ ресурсних елементів (рис. 1.6).

Таблиця 1.2 – Конфігурація субкадрів TDD

| Конфігурація субкадрів S | Нормальний СР вниз | | | Розширений СР вниз | | |
|--------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------|
| | DwPTS | UpPTS | | DwPTS | UpPTS | |
| | T_s | Нормальний СР вниз T_s | Нормальний СР вгору T_s | T_s | Нормальний СР вниз T_s | Нормальний СР вгору T_s |
| 0 | 6592 | 2192 | 2560 | 7680 | 2192 | 2560 |
| 1 | 19760 | | | 20480 | | |
| 2 | 21952 | | | 23040 | | |
| 3 | 24144 | | | 25600 | | |
| 4 | 26336 | | | 7680 | | |
| 5 | 6592 | 4384 | 5120 | 20480 | 4384 | 5120 |
| 6 | 19760 | | | 23040 | | |
| 7 | 21952 | | | - | - | - |
| 8 | 24144 | | | - | - | - |

При передачі інформації від eNB, частина ресурсних елементів йде на передачу опорних символів, отже максимальна швидкість передачі зменшуються. Опорні символи використовуються для організації когерентної демодуляції і проведення оцінки каналу.

Для розрахунку пропускної здатності мережі LTE, необхідно визначити наступні умови:

- **Ширина каналу.** Розглядаючи специфікацію 3GPP щодо допустимої конфігурації ширини каналу, можна відзначити, що мережа LTE підтримує тільки фіксовану ширину каналу в 1.4, 3, 5, 10, 15, 20 МГц. Швидкість передачі даних залежить від кількості ресурсних блоків, а вже кількість ресурсних блоків – від ширини каналу зв'язку. Нижче наведена

таблиця для порівняння кількості ресурсних блоків від використаної ширини каналу (табл. 1.3).

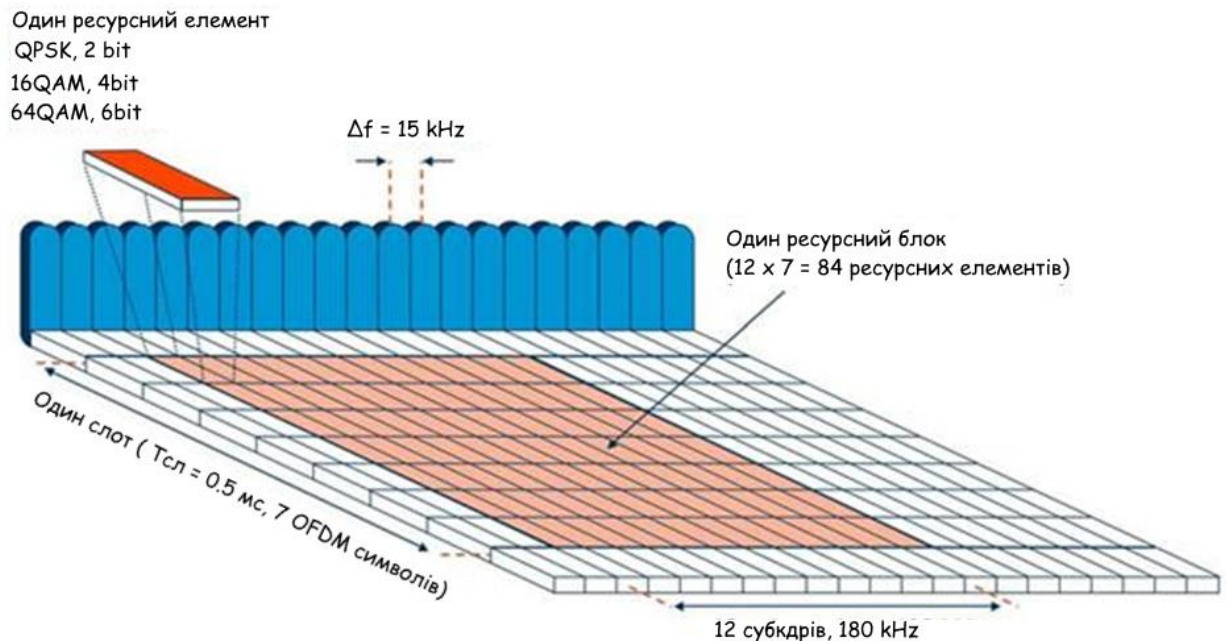


Рисунок 1.6 – Структура ресурсного блоку

Таблиця 1.3 – Порівняння ширини каналу з кількістю ресурсних блоків

| | | | | | | |
|----------------------------|-----|----|----|----|----|-----|
| Ширина каналу, МГц | 1.4 | 3 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| Кількість ресурсних блоків | 6 | 15 | 25 | 50 | 75 | 100 |

- Якість каналу розраховується в залежності від радіоумов, в яких перебуває абонент, визначаючи оптимальну схему модуляції MCS – Чим вищий порядок має модуляційна схема, тим більшу кількість біт можливо передати за одиницю часу. TBS індекс означає розмір транспортного блоку, або яку кількість даних в бітах можливо передати за одиницю часу TTI [1 мс] (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – MCS індекси

| MCS індекс | Модуляція | TBS індекс | MCS індекс | Модуляція | TBS індекс | MCS індекс | Модуляція | TBS індекс |
|---------------|-----------|---------------|---------------|-----------|---------------|---------------|-----------|-------------------------|
| 0 | QPSK | 0 | 10 | 16 QAM | 9 | 21 | 64 QAM | 19 |
| 1 | | 1 | 11 | | 10 | 22 | | 20 |
| 2 | | 2 | 12 | | 11 | 23 | | 21 |
| 3 | | 3 | 13 | | 12 | 24 | | 22 |
| 4 | | 4 | 14 | | 13 | 25 | | 23 |
| 5 | | 5 | 15 | | 14 | 26 | | 24 |
| 6 | | 6 | 16 | | 15 | 27 | | 25 |
| 7 | | 7 | 17 | 64 QAM | 15 | 28 | | 26 |
| 8 | | 8 | 18 | | 16 | 29 | QPSK | Заре- зерво- вано |
| 9 | | 9 | 19 | | 17 | 30 | 16 QAM | |
| | | | 20 | | 18 | 31 | 64 QAM | |

Для того, щоб узгодити вибір модуляційної схеми, мобільна станція вимірює якість сигналу в каналі зв'язку і надсилає показники CQI для базової станції і вже від залежності цих показників, базова станція обирає кодово-модуляційну схему (табл. 1.5).

Таблиця 1.5 – CQI індекси

| Модуляція | QPSK | | | | | | 16QAM | | | 64QAM | | | | | |
|-----------|------|---|---|---|---|---|-------|---|---|-------|----|----|----|----|----|
| CQI | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |

- Завантаження мобільної мережі. Доступні радіоресурси розподіляються поміж користувачами, тож чим більше користувачів будуть одночасно використовувати мобільну мережу, тим менше радіоресурсів

будуть доступні окремо одному користувачу. Варто додати, що розподілення ресурсів мережі також може залежати від пріоритету користувача в мережі і кількості наявних з'єднань.

Розглянемо приклад розрахунку максимальної швидкості в мережі LTE для одного абонента, який знаходиться в ідеальних радіоумовах, з шириною каналу зв'язку 10 МГц. Використовуючи таблицю (номер) , визначаємо кількість ресурсних блоків, що будуть задіяні для передачі: для ширини каналу в 10 МГц – це 50 блоків. Ідеальними радіоумовами будемо вважати випадок, коли MCS індекс дорівнює 28 та TBS індекс 26, відповідно. Знаючи кількість ресурсних блоків та TBS індекс, можна визначити розмір транспортного блоку, відповідно до специфікації 3GPP TS 36.213 version 12.3.0 Release 12 .

Таблиця 1.6 – Розмір TBS блоку; сторінка 54 стандарту 3GPP TS 36.213 version 12.3.0 Release 12

| I_{TBS} | N_{PRB} | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 |
| 0 | 1128 | 1160 | 1192 | 1224 | 1256 | 1256 | 1288 | 1320 | 1352 | 1384 |
| 1 | 1480 | 1544 | 1544 | 1608 | 1608 | 1672 | 1736 | 1736 | 1800 | 1800 |
| 2 | 1800 | 1864 | 1928 | 1992 | 2024 | 2088 | 2088 | 2152 | 2216 | 2216 |
| 3 | 2408 | 2472 | 2536 | 2536 | 2600 | 2664 | 2728 | 2792 | 2856 | 2856 |
| 4 | 2984 | 2984 | 3112 | 3112 | 3240 | 3240 | 3368 | 3496 | 3496 | 3624 |
| 5 | 3624 | 3752 | 3752 | 3880 | 4008 | 4008 | 4136 | 4264 | 4392 | 4392 |
| 6 | 4264 | 4392 | 4584 | 4584 | 4776 | 4776 | 4968 | 4968 | 5160 | 5160 |
| 7 | 4968 | 5160 | 5352 | 5352 | 5544 | 5736 | 5736 | 5992 | 5992 | 6200 |
| 8 | 5736 | 5992 | 5992 | 6200 | 6200 | 6456 | 6456 | 6712 | 6968 | 6968 |
| 9 | 6456 | 6712 | 6712 | 6968 | 6968 | 7224 | 7480 | 7480 | 7736 | 7992 |
| 10 | 7224 | 7480 | 7480 | 7736 | 7992 | 7992 | 8248 | 8504 | 8504 | 8760 |
| 11 | 8248 | 8504 | 8760 | 8760 | 9144 | 9144 | 9528 | 9528 | 9912 | 9912 |
| 12 | 9528 | 9528 | 9912 | 9912 | 10296 | 10680 | 10680 | 11064 | 11064 | 11448 |
| 13 | 10680 | 10680 | 11064 | 11448 | 11448 | 11832 | 12216 | 12216 | 12576 | 12960 |
| 14 | 11832 | 12216 | 12216 | 12576 | 12960 | 12960 | 13536 | 13536 | 14112 | 14112 |
| 15 | 12576 | 12960 | 12960 | 13536 | 13536 | 14112 | 14688 | 14688 | 15264 | 15264 |
| 16 | 13536 | 13536 | 14112 | 14112 | 14688 | 14688 | 15264 | 15840 | 15840 | 16416 |
| 17 | 14688 | 15264 | 15264 | 15840 | 16416 | 16416 | 16992 | 17568 | 17568 | 18336 |
| 18 | 16416 | 16416 | 16992 | 17568 | 17568 | 18336 | 18336 | 19080 | 19080 | 19848 |
| 19 | 17568 | 18336 | 18336 | 19080 | 19080 | 19848 | 20616 | 20616 | 21384 | 21384 |
| 20 | 19080 | 19848 | 19848 | 20616 | 20616 | 21384 | 22152 | 22152 | 22920 | 22920 |
| 21 | 20616 | 21384 | 21384 | 22152 | 22920 | 22920 | 23688 | 24496 | 24496 | 25456 |
| 22 | 22152 | 22920 | 22920 | 23688 | 24496 | 24496 | 25456 | 25456 | 26416 | 27376 |
| 23 | 23688 | 24496 | 24496 | 25456 | 25456 | 26416 | 27376 | 27376 | 28336 | 28336 |
| 24 | 25456 | 25456 | 26416 | 26416 | 27376 | 28336 | 28336 | 29296 | 29296 | 30576 |
| 25 | 26416 | 26416 | 27376 | 28336 | 28336 | 29296 | 29296 | 30576 | 31704 | 31704 |
| 26 | 30576 | 30576 | 31704 | 32856 | 32856 | 34008 | 35160 | 35160 | 36696 | 36696 |

З наведеної таблиці легко визначити розмір блоку, у нашому випадку він буде складати 36696 бітів. Ділимо це значення на один тактовий інтервал (одну мілісекунду), отримуємо швидкість в бітах за одну секунду:

$$\frac{36696}{0,001} = 36696 * 1000 = 36696000 \text{ [біт/с]}$$

Враховуючи, що в одному мегабіті 1048576 біт, отимаємо:

$$\frac{3669600}{1024 * 1024} = 34.99 \text{ [Мбіт/с]}$$

1.3 Висновки до розділу 1

Розглядаючи перший розділ, було виділено основні елементи архітектури мережі LTE та її загальну структуру. Оновлена архітектура мережі дозволяє, в разі необхідності, збільшити пропускну здатність мережі для обслуговування більшої кількості трафіку. Посилаючись на міжнародний стандарт електрозв'язку та наукову літературу, були визначенні основні відмінності технології LTE від мережі минулого покоління, а також основні вимоги до мережі LTE.

Також, в даному розділі було зазначено ресурси мережі, структуру кадру для різних режимів дуплексу – FDD та TDD. Розглянута технологія OFDM була застосована в мережі 4-го покоління, забезпечивши більш стабільну роботу під час складних радіоумов для передачі сигналу.

2 САМООПТИМІЗАЦІЯ ТА УПРАВЛІННЯ ЧАСТОТНИМИ РЕСУРСАМИ LTE

2.1 Алгоритм самоконфігурації мережі

В удосконаленій архітектурі SAE було впроваджено самоорганізовану мережу SON . Вона являє собою технологією автоматизації в таких напрямках: управління ресурсами мережі, самооптимізація та самоконфігурація. Всі функції SON стандартизовані в межах пакету 3GPP. Вузли такої мережі здатні самостійно знаходити один одного і в разі виходу з ладу одного вузла мережі, можуть встановлювати нові маршрути для передачі.

Процес самоконфігурації мережі полягає в тому, що вузли базових станцій eNB можуть бути автоматично під'єднані або від'єднані на основі заданих процедур. Під час підключення eNB з сервера конфігурацій OAM – завантажується необхідна інформація про списки сусідніх базових станцій, виділяється IP адреса, відбувається процес логічного та фізичного з'єднання між елементами мережі. Можливий варіант самоконфігурації зазначений на рисунку 2.1.

Можна виділити основну особливість подібного алгоритму, а саме: підключення і налаштування нової базової станції eNB відбувається через чинну соту сусідньої базової станції.

Розглянемо більш ретельно алгоритм самоконфігурації.

1. В самому початку передачі eNB поводитися як UE;
2. Відбувається процес сканування мережі для пошуку сусідніх базових станцій;
3. Новий eNB обирає спонсорську eNB, яка має діюче з'єднання з ядром мережі;
4. Новий eNB запрошує доступ до мережі використовуючи спеціальні коди, які відрізняють його від UE;

5. Відбувається взаємна аутентифікація нової базової станції. Спонсорська базова станція запрошує OAM на проведення процедури аутентифікації, по завершенню якої нова базова станція отримує його IP адресу та IP адресу, що обслуговує шлюз і сервер OAM;

6. Відбувається завантаження необхідного програмного забезпечення в нову базову станцію;

7. По завершенню всіх необхідних завантажень, eNB конфігурую себе;

8. Нова базова станція замінює свій статус на (mode) і починає працювати, як eNB;

9. Нова базова станція встановлює логічні та фізичні зв'язки між вузлами судніми секторами інших базових станцій і встановлює зв'язок з ядром мережі;

10. Процес самоконфігурації закінчений. Нова базова станція готова до повноцінної роботи;

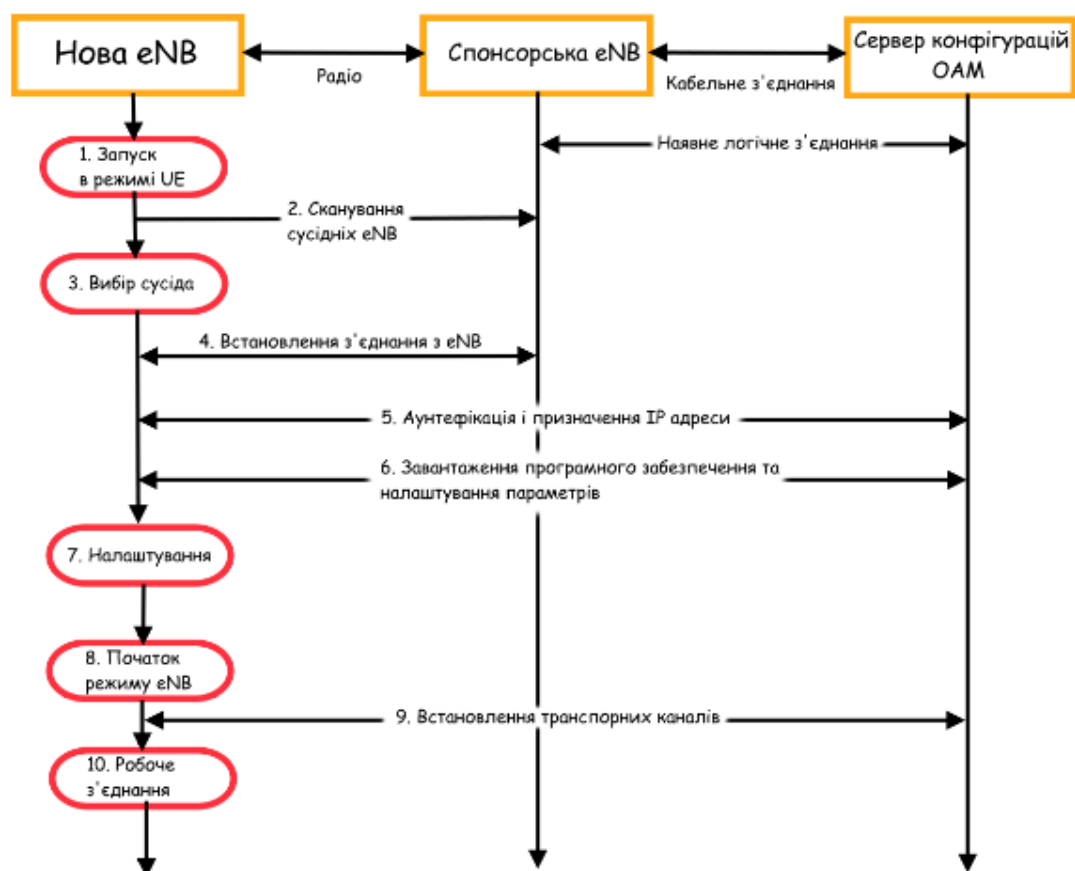


Рисунок 2.1–Алгоритм самоконфігурації

Процес самооптимізації мережі базується на раціональному розподіленні навантаження за допомогою зовнішніх інструментів оптимізації налаштовує оптимальні конфігураційні дані для мережі. Типовим прикладом такого алгоритму є алгоритм оптимізації списку сусідів базової станції ANR (Automatic Neighbor Relation). Оскільки мережа LTE постійно зростає по кількості нових базових станцій, оновлювання налаштування списку сусідніх базових станцій спричиняє багато незручностей, якщо використовувати звичайну процедуру конфігурації. ANR дозволяє системі автоматично налаштовувати сусідів, а також додавати нових сусідів за допомогою UE. Функція ANR покладається на UE для того, щоб він виявив відсутні у списку сусідів нові стільники базових станцій. Розглянемо алгоритм ANR (рис. 2.2):

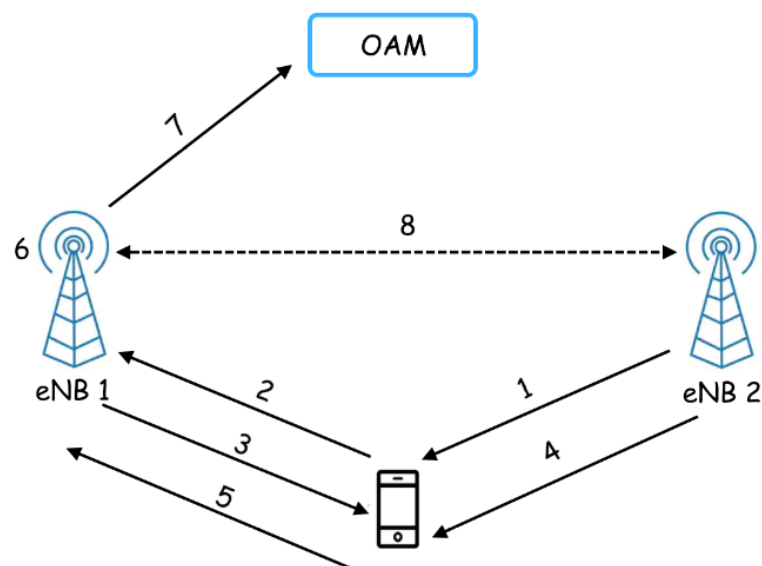


Рисунок – 2.2 Алгоритм ANR

1. UE виконує вимірювання відповідно до конфігурації вимірювань, що встановлена в EUTRAN. Наприклад, UE виявляє в мережі EUTRAN новий стільник з фізичним ідентифікатором 3;
2. UE надсилає звіт про вимірювання до обслуговуючої eNB , використовуючи Physical ID для того, щоб ідентифікувати різні стільники всередині мережі E-UTRAN;

3. eNB отримує звіт від UE та інструктує його повідомити про глобальний ідентифікатор нового стільника з фізичним ідентифікатором 3;
4. UE отримує глобальний ідентифікатор стільника, читаючи коди BCCH каналу виявленого стільника.
5. UE звітує до обслуговуючої eNB про глобальний ідентифікатор нового стільника.
6. Обслуговуючий eNB оновлює список сусідів, добавляючи туди нову eNB.
7. Обслуговуючий eNB надсилає оновлений список сусідів до OAM і отримує IP адресу нової виявленої комірки від OAM.
8. Якщо потрібно, обслуговуюча eNB встановлює нове з'єднання з новою eNB, використовуючи інтерфейс X2.

2.2 Самооптимізація мережі та розподілення навантаження

В якості самооптимізації, мережа LTE може використовувати процедуру хендоверу для рівномірного розподілу навантаження на мережу (рис. 2.3). Враховуючи, що трафік, який надходить від абонентів, являє собою випадковий процес і напряму залежить від кількості абонентів, які в цей час обслуговуються сотою базової станції, нерідко призводить до того, що велике скупчення абонентів в одному місці викликає перевантаження обслуговуючої базової станції. Варто зазначити, що процес самооптимізації можливий тільки у тому випадку, коли в сусідніх стільниках є вільний каналний ресурс. Рішення, яке приймається під час самооптимізації мережі, полягає в оптимізації хендоверів мережі шляхом змінення критеріїв стільника, що впливають на його повторний вибір.

Під час розподілу навантаження на мережу eNB обмінюються між собою наступною інформацією:

- Використання радіоресурсу (загальна кількість ресурсних блоків, які застосовуються для лінії передачі вверх та вниз)
- Індикатор завантаження радіоінтерфейсу.

- Індикатор завантаження транспортних блоків на лінії передачі вверх та вниз.
- Об'єм пропускної здатності стільника, який може бути виділений для балансування навантаження вверх та вниз.
- Індикатор відносної пропускної здатності стільника

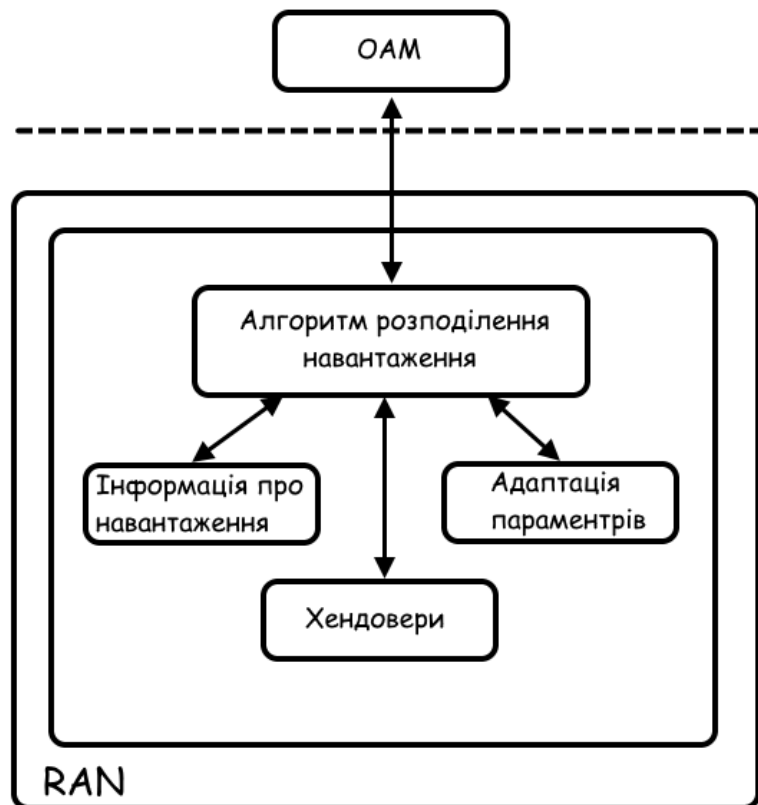


Рисунок – 2.3 Схема розподілення навантаження

На даний момент продовжується розробка алгоритмів MLB (Mobility Load Balancing), які спрямовані на автоматичну оптимізацію навантаження в мережі LTE. Результатом таких алгоритмів має стати зниження затримок в мережі.

Розглянемо сам процес хендовера.

Хендовер – це процедура автоматичного перемикавання терміналу (абонента) між базовими станціями мережі багатостанційного радіодоступу (рис. 2.4).

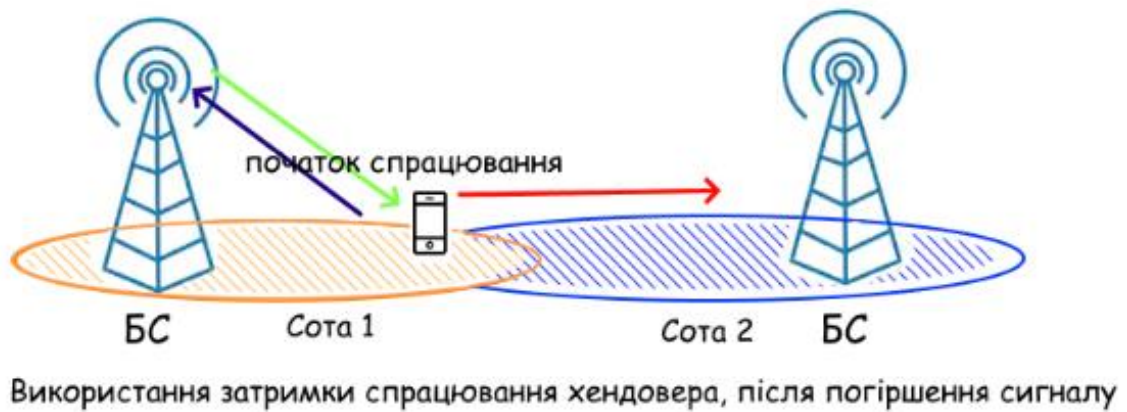


Рисунок – 2.4 Процедура хендовера

Він використовується для того, щоб забезпечити якісне і безперервне з'єднання терміналу через мобільну мережу під час руху або в режимі очікування. Сам процес базується на вимірюванні приймачем абонентського терміналу рівнів сигналу від базових станцій. Базова станція повідомляє UE, коли необхідно відправляти повідомлення про вимірювання рівня вхідного сигналу (Measurement reports), використовуючи повідомлення RRC Connection Reconfiguration. Умовою для надсилання подібних звітів виступають прапори A1-A5. Прапори містять перелік критеріїв для спрацювання, а також їх сценарій зміни та спрацювання. При спрацюванні одного з прапорів, UE відправляє повідомлення для базової станції, в якому вказує ідентифікатори обслуговуючої та сусідньої соти, а також зміну рівня сигналу і його якості.

Мета оптимізації хендовера - забезпечити якісний канал зв'язку між базовою станцією та абонентом. Для спрацьовування прапора необхідно, щоб зміни, які відбулися з якісною характеристикою сигналу були зафіксовані протягом деякого часу (time-to-trigger). Залежно від обраної затримки, можливо домогтися своєчасного рішення про зміну обслуговуючої соти під час різних сценаріїв роботи. Тривалість спрацьовування прапора може набувати таких значень: 0, 40, 64, 80, 100, 128, 160, 256, 320, 480, 512, 640, 1024, 1280, 2560, 5120 [мс]. Варто відзначити, що при низькому значенні часу затримки може з'явитися ефект ring-pong. Він проявляється в тому, що рішення про зміну обслуговуючої соти будуть прийматися поспіхом, в результаті чого UE буде постійно змінювати з'єднання між сотами базових станцій, в яких рівень сигналу приблизно однаковий. Подібне "залипання" часто спостерігається на межах перетину сот і створює затримки для абонента.

Розглянемо більш детально умови, при яких спрацьовують прапори в стандарті LTE:

- Прапор A1: рівень сигналу від обслуговуючої базової станції перевищив визначений поріг.
- Прапор A2: рівень сигналу від обслуговуючої базової станції погіршився відносно порогового значення.
- Прапор A3: рівень сигналу від сусідньої базової станції покращився, у порівнянні з рівнем сигналу від обслуговуючої базової станції на задане значення.
- Прапор A4: рівень сигналу від сусідньої базової станції перевищив встановлений поріг.
- Прапор A5: рівень сигналу від обслуговуючої базової станції погіршився відносно визначеного порогу – у той час, як рівень сигналу від сусідньої базової станції перевищив вказаний поріг.

Можна зробити висновок, що для опису процесу хендвера найбільше підходять прапори A3 та A5, оскільки вони у собі одночасно враховують рівень сигналу від обслуговуючої базової станції та від сусідньої. Граничне значення для спрацювання прапора може бути висталено в залежності від того, де саме використовується базова станція. Наприклад, в місті щільність мобільної мережі вище, ніж за його межами, тож якість каналу зв'язку в населеному пункті буде гірше, ніж на відкритій місцевості через вплив шумових перешкод та інших завад. Це створює відповідні вимоги під час налаштування і вибору оптимального порогового значення.

При детальному розгляді умов для спрацювання прапора A3 (рис. 2.5) необхідно забезпечивши умову :

$$Meas_{neigh} + O_{neighfreq} + O_{neighcell} - Hyst > Meas_{serv} + O_{servfreq} + O_{servcell} + Offset$$

- *Hyst* – гістерезис значення, яке використовується для того, щоб уникнути частого переключення. Може приймати величину в діапазоні 0...20 дБ.

- *Meas_{neigh}* – значення потужності сигналу обслуговуючої базової станції.
- *Meas_{serv}* – значення потужності сигналу сусідньої базової станції.
- *O_{neighfreq}* та *O_{servfreq}* – встановлює пріоритет для частот, на яких працює обслуговуюча базова станція та сусідня.

- *O_{neighcell}* та *O_{servcell}* – встановлює пріоритет для обслуговуючої та сусідньої базової станції, приймає значення в діапазоні -24...24 дБ.

- *Offset* – значення, яке відображає різницю між потужністю сигналу сусідньої базової станції та потужністю сигналу обслуговуючої.

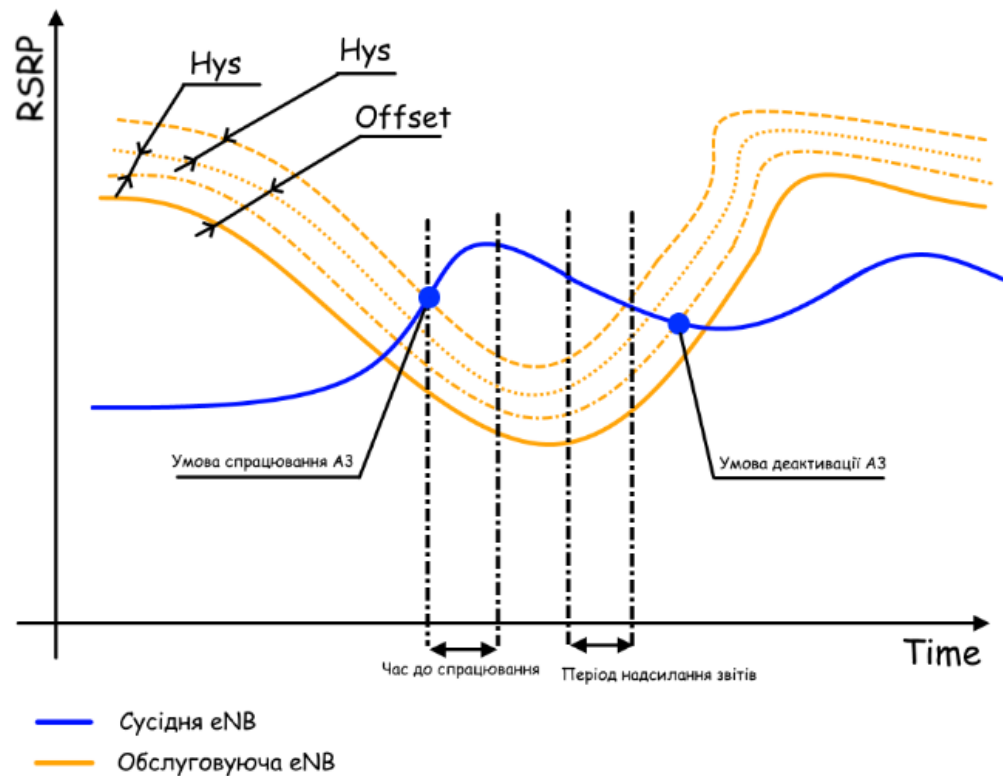


Рисунок – 2.5 Прапор A3

Прапор A3 перестає бути активним, коли UE перестає надсилати звіти при умові :

$$Meas_{neigh} + Oneigh, freq + Oneigh, cell + Hyst < Meas_{serv} + Oserv, freq + Oserv, cell + Offset$$

2.2 Принципи керування частотним ресурсом мережі

Основна мета управління частотним ресурсом полягає у досягненні максимальної пропускної здатності мережі з відповідною якістю QoS

Для забезпечення ефективного використання частотного ресурсу в мережі LTE використовують планувальник частотним сектором. Планувальник визначає допустимий компроміс між пропускною здатністю стільника та характеристиками QoS для кінцевого користувача. Для перевірки поточних каналних ресурсів використовують

управління доступом базової станції. Перевірка відбувається до встановлення з'єднання, і по її результатам базова станція може дозволити організацію нового абонентського каналу. Новий канал може ініціювати користувач (UE) чи ядро мережі. Під час організації нового каналу, базова станція приймає рішення на базі того, як розподілені ресурси в соті, вимоги QoS, їх рівні пріоритетів та підтримку QoS для наявних на цей момент з'єднань в обслуговуючій соті. Запит на обслуговування буде схвалений тільки у тому випадку, якщо є можливість забезпечити відповідні QoS для каналу зв'язку з відповідними пріоритетами. Варто додати, що планувальник здатний динамічно змінювати параметри QoS чинних каналів.

Відповідно до команд планувальника, групувати пакети і виставляє їх у виглядів готових блоків на передачу. Рішення що до розподілу каналного ресурсу приймається планувальником на базі повідомлень CQI. Під час втрати пакетів від UE, технологія HARQ дозволяє планувальнику вирішити чи надіслати наступні блоки даних.

Для кожного UE і кожного частотного блока, формуються індикатори якості каналу. В залежності від необхідної швидкості передачі, для UE визначається кількість ресурсних блоків PRB, а які це будуть блоки, вже залежить від індексу CQI. Значення, яке приймає CQI знаходиться в діапазоні від 0 до 15 і напряму залежить на швидкість передачі, оскільки на його базі вибирається оптимальна модуляція для тих радіоумов, де перебуває UE.

Для збільшення пропускної здатності системи мережі використовують технологію планування передачі пакетів в частотній області FDPS. Знаючи якість приймання CQI, планувальник виділяє абонентам ресурсні блоки в тій частині смуги, де умови для приймання сигналу найкращі. Використовуючи FDPS, можливий 40% вигравш для пропускної здатності системи. Однак, є один суттєвий недолік роботи такої схеми – велика залежність від актуальної інформації індексів CQI. При великій швидкості переміщення абонента, планувальнику буде складно отримати актуальне значення CQI та

простежити для абонента завмирання на різних частотах виділеного діапазону і вибрати оптимальний.

Розглянемо розподіл каналного ресурсу поміж базовими станціями. Для зниження каналних завад при невеликому навантаженні на мережу, загальний каналний ресурс може бути розподілений між сусідніми базовими станціями, відповідно до навантаження на кожній соті. Таке розподілення ресурсного блоку (рис. 2.7) називають дробовим.

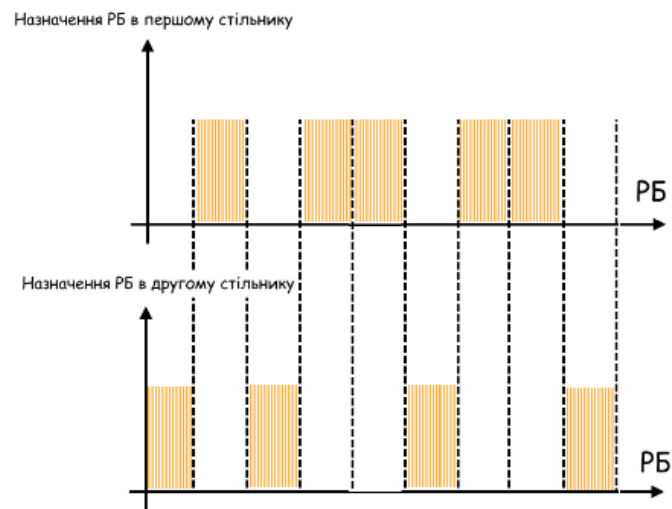


Рисунок – 2.7 Дробове розподілення каналного ресурсу в частотній області

Подібне розподілення не є оптимальним, оскільки таким чином завідомо зменшується ємність кожного стільника, до того ж, смуга частот використовується не ефективно. В мережі LTE застосовуються механізми контролю рівня каналних завад в сусідніх стільниках ICIC, рис.2.8.

Interference Overload Information – використовується для передачі рівня інтерференції, який спостерігається в ресурсному блоці. Interference Indication – повідомлення про намір eNB, які ресурсні блоки вона буде використовувати, що дає час відреагувати сусідній eNB і зменшити рівень інтерференції в зазначених РБ.

Обмін інформацією про спільні завади відбуваються за допомогою інтерфейсу X2, кожна базова станція координує використання каналного

ресурсу між сусідами. Ця інформація далі використовується планувальниками.

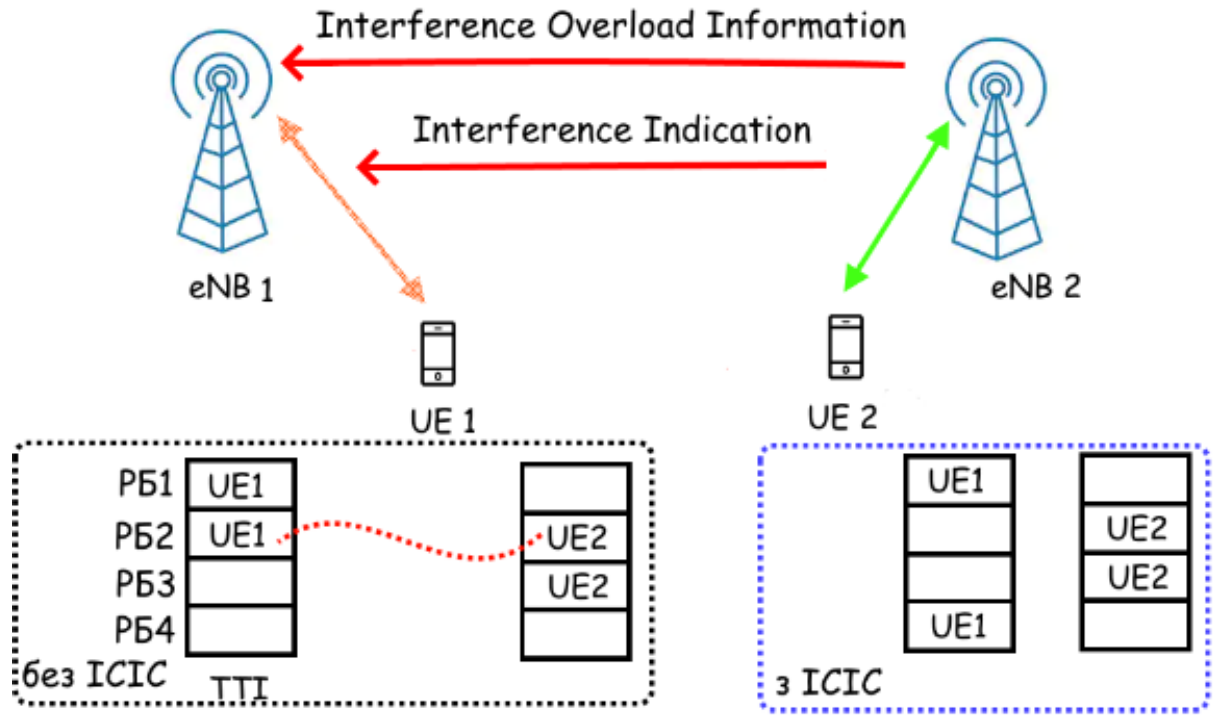


Рисунок – 2.8 Використання ICIC

При жорсткому дробовому розподіленні каналного ресурсу, каналний ресурс розділяють на три частини (рис.2.9). Коефіцієнт повторного використання частот дорівнює 3.

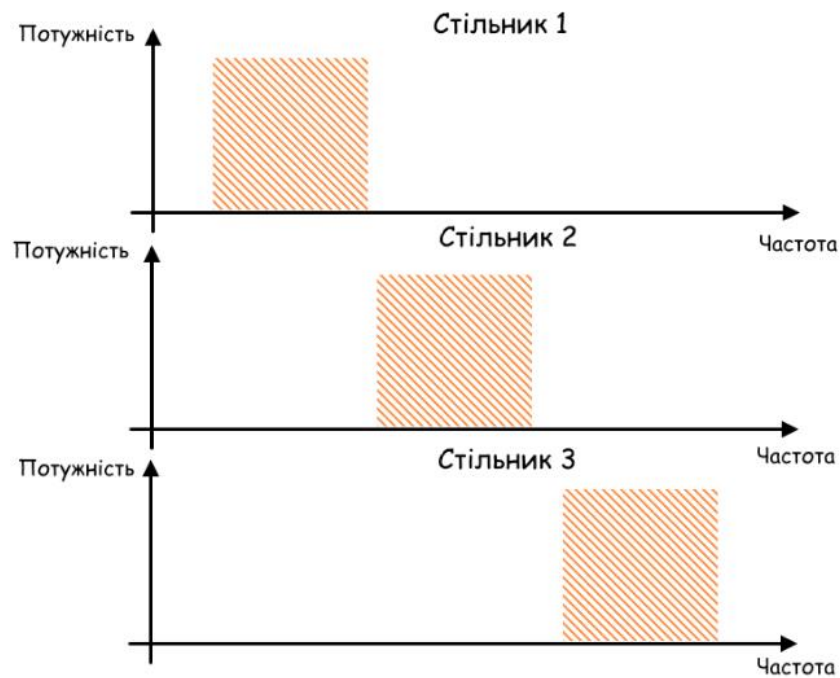


Рисунок – 2.9 Метод жорсткого повторного використання частотного ресурсу

Застосувавши трьох стільникові структури, можливо забезпечити покриття території з достатнім рівнем якості. Однак жорсткий поділ має проблему з ємністю мережі, оскільки при роботі на великі і малі відстані він використовує один фіксований частотний сектор. Тому застосовують метод м'якого повторного використання частотного ресурсу (рис 2.10). Його ідея полягає у тому, що на малі відстані використовується повний частотний сектор, але зі зниженою потужністю сигналу. Таким чином збільшується пропускна здатність мережі.

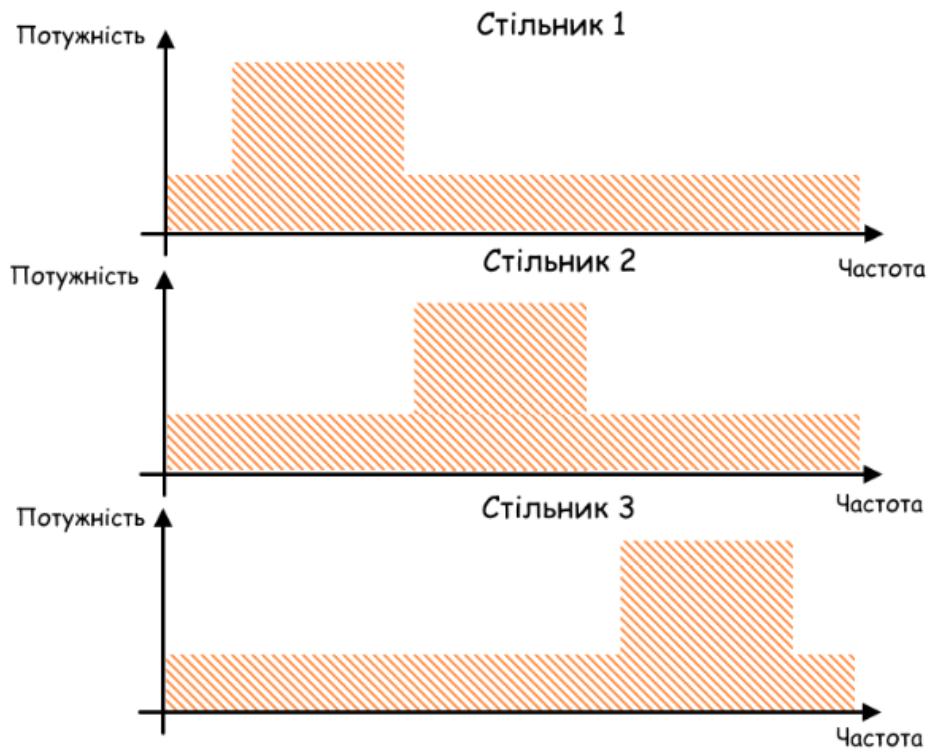


Рисунок – 2.10 Метод м'якого повторного використання частотного ресурсу

Сам планувальник являє собою програмний продукт, розроблений і інтегрований виробником апаратури. На швидкість передачі даних між eNB та UE користувача впливає співвідношення сигнал/шум на вході приймача.

Для оцінки якості сигналу використовують наступні показники:

- RSRP – рівень приймального сигналу від базової станції, вимірюється в дБм. При значеннях -120 дБм та нижче зв'язок може бути нестабільним.

- RSRQ – характеризує якість опорних сигналів, вимірюються в дБм. Опорні сигнали використовуються для оцінки деформації вихідного сигналу заздалегідь відомої форми, в залежності від різних завад, які знаходяться в каналі зв'язку.

- SINR – це відношення рівня корисного сигналу до рівня шуму, вимірюється в дБ. $SINR = S / (I + N)$, де S - потужність сигналу; I - інтерференція; N – потужність шуму;

В таблиці 2.2 відображені рівні сигналу та їх допустимі значення.

Таблиця – 2.2 Якість сигналу

| Якість сигналу | RSRP (дБ) | RSRQ (дБ) | SINR (дБ) |
|----------------|-----------------|----------------|--------------|
| Відмінний | ≥ -80 | ≥ -10 | ≥ 20 |
| Задовільний | $-80 \geq -90$ | $-10 \geq -15$ | $20 \geq 13$ |
| Поганий | $-90 \geq -100$ | $-15 \geq -20$ | $13 \geq 0$ |
| Дуже поганий | ≤ -100 | < -20 | ≤ 0 |

2.2 Висновки до розділу 2

Розглядаючи другий розділ, було виділено самоорганізуючу мережу SON. Функціонал мережі SON стандартизований відповідно пакету 3GPP. Система самоконфігурації мережі дозволяє автоматично встановлювати з'єднання з новими базовими станціями за допомогою вже працюючих сусідніх базових станцій. Процес самооптимізації базується на раціональному розподілі ресурсів мережі, використовуючи вільні канали сусідніх базових станцій. Також, була розглянута процедура автоматичного перемикавання абонента всередині мобільної мережі та вибір оптимальної базової станції для формування каналу зв'язку.

Розглядаючи питання управління каналним ресурсом мобільної мережі, були визначені основні цілі планувальника каналів в eNB. Рішення,

яке було схвалено планувальником, буде залежати від показників якості радіоканалу та величини необхідної максимальної пропускної здатності системи.

3 ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ МЕРЕЖІ LTE

3.1 Критерії якості для різних видів послуг в мережі LTE

Розглянемо показники QoS, що характеризують загальну якість послуг, які надає комунікаційна мережа. Самі QoS розділяють всі послуги на дев'ять типів, кожному з яких відповідають індикатори QCI (табл. 3.1). В свою чергу, канали, які використовуються для передачі трафіка, поділяються на дві групи: з гарантованою швидкістю передачі GBR та з не гарантованою швидкістю передачі Non-GBR.

Таблиця – 3.1 Види QCI

| QCI | Тип ресурсу | Пріоритет | Затримка (мс) | PERL | Послуги |
|-----|-------------|-----------|---------------|-----------|--|
| 1 | GBR | 2 | 100 | 10^{-2} | Телефонія в режимі реального часу |
| 2 | | 4 | 150 | 10^{-3} | Відеозв'язок |
| 3 | | 3 | 50 | 10^{-3} | Ігри в режимі реального часу |
| 4 | | 5 | 300 | 10^{-6} | Відео з буферізацією |
| 5 | Non-GBR | 1 | 100 | 10^{-6} | Сигналізація в мережі (IMS) |
| 6 | | 6 | 300 | 10^{-6} | TCP / IP послуги для пріоритетних користувачів |
| 7 | | 7 | 100 | 10^{-3} | Аудіо, відео в режимі реального часу |
| 8 | | 8 | 300 | 10^{-6} | Відео з буферізацією, TCP / IP послуги |
| 9 | | 9 | | 10^{-6} | |

Послуги класів QoS 1,2, 3 і 7 – це послуги, що надаються абоненту в реальному часі за протоколом UDP/IP. Основним чутливим фактором, який впливає на їх реалізацію, є допустима затримка в доставленні пакетів. Значення PERL вказує на надійність передачі пакетів та вимірюється відносною величиною загублених пакетів. Для протоколу передачі TCP/IP цей показник найнижчий, що вказує на його високу надійність. Варто відзначити, що при передачі даних з гарантованою швидкістю, базова станція повинна керувати ресурсами мережі в динамічному режимі. Використовуючи технологію QoS можливо гарантувати передачу інформації в повному об’ємі для окремого виду трафіку. Для оцінки сприйняття користувачем якості послуг зв’язку, вводять поняття QoE (рис. 3.1). Оцінка сприйняття залежить від кількох факторів, як суб’єктивних, так і об’єктивних. До об’єктивних факторів відносять QoS, оскільки в першу чергу, користувачі помічають недоліки в наданих послугах відповідно до продуктивності та стабільності мережі. Це може бути спотворення чіткості зображення під час перегляду відео чи наявність додаткових шумів при телефонному зв’язку (рис. 3.2).

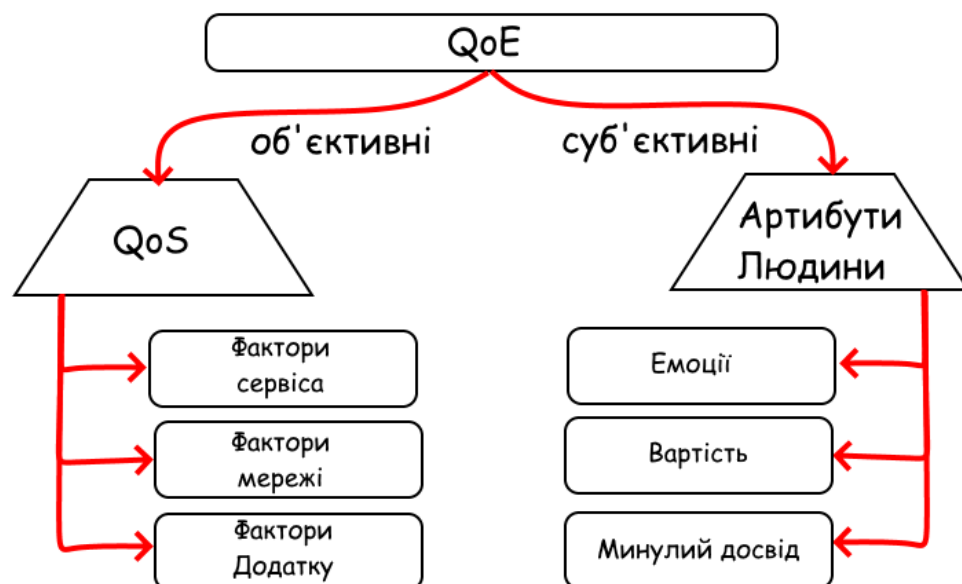


Рисунок – 3.1 Оцінка QoE



Рисунок 3.2 – Оцінка часу затримки додатку

Для оцінки якості мобільної мережі під час голосового виклику використовують так звану Е-модель, згідно з рекомендацією ITU-T G.107.

Для цього вводять коефіцієнт оцінки якості передачі, котрий об'єднує всі параметри передачі, які мають відношення до цього з'єднання.

Даний коефіцієнт можна представити наступною формулою:

$$R = R_o - I_s - I_d - I_e - eff + A,$$

де R_o - співвідношення сигнал/шум;

I_s – гучність голосу під час розмови в кані зв'язку;

I_d – рівень спотворень, що викликані затримкою сигналу;

$I_e - eff$ – коефіцієнт зниження ефективності обладнання, що спричинене зниженням якістю кодеків з низькою бітовою швидкістю;

A – рівень допустимого зниження якості QoE, з яким користувач згоден миритися;

На оцінку якості відео впливають фактори контрастності, яскравості та наявності спотворень зображення. Для якісної оцінки відео можуть використовуватися спеціальні програмні засоби, котрі знаходять в відео дефекти та зайвий шум.

KQI – показник якості функціонування мережі на рівні сервісів, можна сказати що KQI характеризує щось середнє між QoE та KPI. Варто зазначити, що у порівнянні з KPI, він характеризує загальну якість надання послуг та їх оцінку зі сторони користувача. В якості прикладу розглянемо швидкість завантаження вниз для стільникової комірки мережі та абонента. В першому випадку, швидкість буде рахуватися, як міра продуктивності за допомогою KPI, а для другого випадку – як показник якості сервісу, що наданий абоненту.

3.2 Показники KPI

Для оцінки показника якості функціонування мережі вводять показники KPI (Key Performance Indicator). В процесі експлуатації мережі необхідно перевіряти значення KPI для моніторингу стану мережі в режимі онлайн та оптимізації загальної продуктивності мережі. Подібні своєчасні заходи реагування на можливі проблеми дозволяють забезпечити більш ефективне використання ресурсів мережі та кращі показники якості для абонентів.

Всі KPI розділяються на типи:

- SR– характеризує загальний відсоток вдалих ініціалізацій подій;
- AVG– середнє значення на основі вибірки;
- SUM– загальне сумарне значення параметра, яке постійно збільшується;

В мережі LTE розрізняють KPI в залежності від відношення до певної категорії:

- Accessibility – характеризує показник доступності для послуг в наявних умовах зв'язку: RRC SR, ERAB SR, Call Setup SR;
- Retainability – спроможність мережі зберігати наявне з'єднання абонента з необхідними йому сервісами: Call drop SR, Service Call drop SR;
- Mobility – показник продуктивності мережі при роботі з рухомими об'єктами, зберігаючи активне з'єднання з ними: Intra/Inter-Frequency Handover Out SR, Inter-RAT Handover Out SR(LTE to WCDMA);
- Integrity – оцінка якісних показників мережі: Cell Downlink/Uplink Throughput;
- Availability – показник готовності мережі для надання послуг: Cell Availability;
- Utilization – показник завантаженості мережі: LTE Utilization, Downlink/Uplink Utilization.

Розрахунки основних KPI:

- RRC Setup Success Rate

$$RRCS_SR_{service} = \frac{RRCConnectionSuccess_{service}}{RRCConnectionAttempt_{service}} \times 100\%$$

RRC Setup SR – показник вдалих з'єднань, обчислюється на базі загальної кількості запитів на з'єднання, від кількості вдалих з'єднань.

- ERAB Setup Success Rate

$$RABS_SR = \frac{ERABSetupSuccess}{ERABSetupAttempt} \times 100\%$$

ERAB Setup SR – ймовірність вдалого з'єднання RAB отримати повне з'єднання з EPS та доступ до всіх сервісів в стільниковій радіомережі.

- Call Setup SR

$$CSSR = \frac{RRCConnectionSuccess_{service}}{RRCConnectionAttempt_{service}} \times \frac{S1SIGConnectionEstablishSuccess}{S1SIGConnectionEstablishAttempt} \times \frac{ERABSetupSuccess}{ErabSetupAttempt} \times 100\%$$

Call Setup SR – показник вдалих з'єднань для всіх послуг, він розраховується з використанням RRC SR, ERAB SR та S1 Signaling Connection Establishment SR.

- Call Drop SR

$$Service_CDR = \frac{ERABAbnormalRelease}{ERABRelease} \times 100\%$$

Call Drop SR – відсоток обривів телефонного зв'язку до загальної кількості з'єднань.

- Intra-Frequency Handover Success Rate

$$IntraFreqHOOOut_SR = \frac{IntraFreqHOOOutSuccess}{IntraFreqHOOOutAttempt} \times 100\%$$

Intra-Frequency Handover SR – зображає відсоток вдалих хендоверів під час перемикання на сусідню стільникову мережу, зі збереженням поточної технології використання (з 4G на 4G).

- Cell Downlink/Uplink Throughput

$$CellDLAveThp = \frac{CellDLTrafficVolume}{CellDLTransferTime}$$

Cell Downlink/Uplink Throughput- оцінює середню пропускну здатність комірки мережі під час передачі даних. Лічильники вимірюють загальний об'єм трафіку для кожної служби з конкретним QCI.

- Availability

$$Availability = \frac{Time_{cell_available}}{Time_{measurement}} \times 100\%$$

Availability – показник доступності комірки відносно часу безперебійної роботи цієї комірки.

3.3 Оцінка якості мережі

До методів оцінки якості мережі можна віднести:

- Метод оцінки та обробки мережевої статистики.
- Драйв-тести.
- Програмні засоби на абонентському обладнанні.

Розглянемо більш детально кожний із цих методів, а також їх переваги та недоліки. Мережева статистика збирається з результатів роботи UTRAN, обробляється і виводиться у вигляді показників КРІ які дозволяють не тільки надати загальну оцінку ефективності роботи мережі, а й провести аналіз в окремому місці. До суттєвих недоліків такого способу оцінки можна віднести високу розбіжність з реальною моделлю. Подібний спосіб використовується для грубої оцінки, або у комбінації з наступними способами.

Драйв-тести – один із методів тестування мережі. Результати подібного тестування максимально наближені до реального стану мережі під час щоденної роботи. Використовуючи спеціальне мобільне обладнання та програмні заходи, кваліфікованою командою спеціалістів відбувається замір та фіксація показників в мережі. Це може бути як і звичайна перевірка значень рівнів сигналу від базової станції, так і детальний тест функціонування мережі в залежності від спрямованого типу трафіку, наприклад: тест голосових дзвінків, якості відео, швидкості завантаження, тощо. Після виконання подібного тесту, його результати ретельно аналізуються в програмах, котрі дозволяють візуалізувати його результати відповідно маршруту замірів. Такий підхід дозволяє точно ідентифікувати проблеми в мережі, однак сам по собі являється досить ресурсомістким. Крім того, існує ще один суттєвий недолік – загалом, драйв-тести оцінююся зі сторони дороги, з якої й був проведений тест.

Останній підхід – програмні засоби на абонентському обладнанні, комбінує у собі попередні два. Тестування якості мережі відбувається скрізь, де абонент використовує послуги зв'язку. Подібні виміри будуть

максимально наближені до кінцевого користувача, однак будуть залежати від його мотивації під час проведення тесту. Крім того, обладнання, яке використовує абонент, може просто не підтримувати повний функціонал оператора. Такий спосіб тестування не застосовується настільки глобально, як перші два, однак дуже зручний для локальної оцінки стану мережі під час обробки скарг від абонента.

3.4 Висновки до розділу 3

Розглядаючи третій розділ, було визначено основні показники оцінки якості зв'язку в мережі LTE. Якщо QoS характеризує вірогідність проходження паку між двома вузлами мережі, то QoE – сприйняття абонентом загальної якості послуги. Для визначення QoE використовують QoS, а також людський фактор відчуття якості послуг мережі.

Для характеристики та оцінки продуктивності мобільної мережі використовують показники KPI, за допомогою яких можливо проводити якісний моніторинг мобільної мережі в режимі онлайн. Для оцінки реальних показників мобільної мережі використовують методи перевірки за допомогою драйв-тесту (drivetest).

4 УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПОСЛУГ В МЕРЕЖАХ LTE

4.1 Забезпечення якості послуг

Основною задачею процесу оптимізації в мережі LTE є забезпечення необхідного рівня якості QoE для кінцевих користувачів. Для підтримки відповідного рівня якості в мобільній мережі необхідно проводити постійний моніторинг основних показників мережі, аналізуючи та обробляючи вхідні данні. Результатом гарної оптимізації можуть слугувати: зниження рівня завад, покращення показників ефективності роботи мережі, її ємності, покриття, пропускну здатності та інших показників KPI. Як тільки мережа чи її окремих елемент був введений у експлуатацію, відбувається постійний контроль показників. Для подібного контролю можуть використовуватися автоматичні системи реагування на випадки збоїв апаратної частини мережі та деградацію показників KPI. Такі системи не можуть приймати самостійного рішення щодо інцидентів, котрі відбуваються в мережі, однак вони фіксуються та інформують оператора про наявні проблеми. Завдання оптимізації з часом становиться все важчим, оскільки мобільна мережа постійно розширюється за рахунок збільшення кількості кінцевих користувачів, що спричиняє зростання трафіку та навантаження на мережу. Це все означає, що для підтримання заданого рівня якості послуг, процес оптимізації повинен постійно підвищувати ефективність роботи мережі, даючи змогу оператору приймати зважені та обґрунтовані рішення по відношенню до стратегічних інвестицій.

Оптимізація мережі розділяється на дві основні фази, а саме початкову оптимізацію та неперервну. Початкова оптимізація виконується під час ведення мережі, чи її окремого елемента, з метою досягнення запроектованих показників по рівню покриття та якості.

Під неперервною оптимізацією можна розглядати циклічний непервинний двоетапний процес, який включає в себе процес обробки даних та їх збір.

Перший етап – збір даних. Виконується оцінка робочих характеристик та послуг абонентського доступу та виконується збір необхідних даних. Набір даних може комбінувати у собі показники мережі KPI та показники драйв-тестів, котрі відображають реальний стан мережі.

- Другий етап – аналіз даних. Процес аналізу повинен мати автоматичну систему обробки (наприклад: розрахунок показників KPI), за результатом якої вже будуть відбуватися зміни в мережі за допомогою коригуючих дій.

Розглянемо основні показники, на базі яких виконується оцінка ефективності мережі.

- Покриття (Coverage). Характеризує площу, яка покривається одним стільником. Результатом тестування покриття є значення рівнів потужності сигналу від базової станції, на різному віддалені від неї (рис. 4.1).

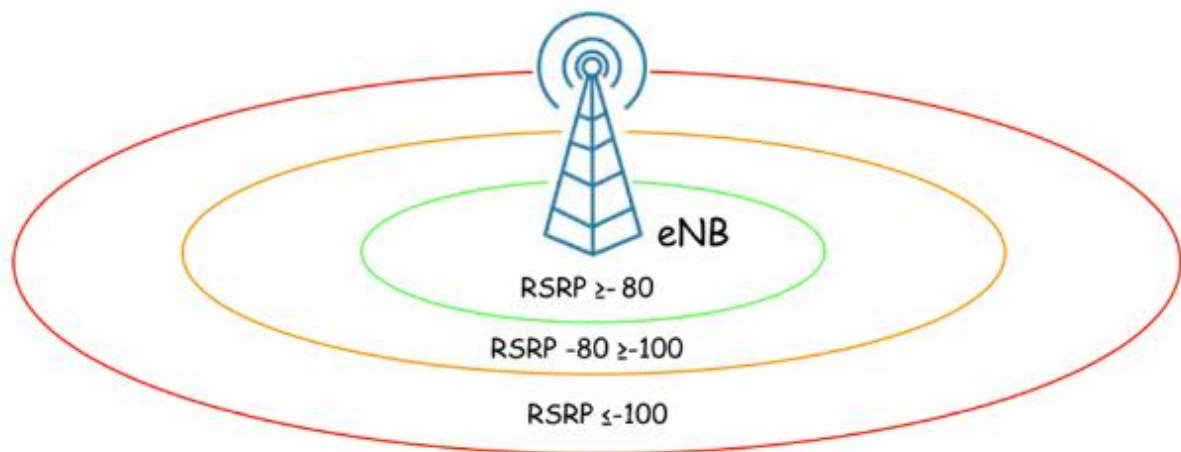


Рисунок – 4.1 Рівні покриття

- Покриття регулюється трьома основними параметрами:
- Висота антени. В залежності від висоти підйому антени буде відповідна площа покриття. Чим більша висота щогли, на яку закріплюється антена, тим на більшу відстань вона буде працювати.
- Кут нахилу антени – дозволяє налаштувати площу покриття, на якій показники RSRP будуть задовольняти встановленим вимогам.
- Значеннями азимутів для кожного стільника eNB.

- Потужність стільника.

Зазвичай для проектування мережі в межах міста використовуються стільники з потужністю 60 Вт, а для відкритих ділянок 80Вт. Це обумовлено відстанню до абонента – в межах міста набагато більше користувачів та обслуговуючих базових станцій, тому необхідно розташовувати eNB частіше, ніж на відкритих ділянках. Варто зазначити що використання в місті стільників з потужністю в 80Вт впливає на загальний рівень шуму, що в свою чергу знижує рівні RSRQ та SINR, а вже від їх значень планувальником частотного спектру розраховується CQI та обирається тип модуляції.

- Ємність (Capacity). Дані, що були зібрані з системи управління, зазвичай використовуються для оцінки потужності мережі. Для оцінки ємності часто використовують інформацію бенчмарків мобільної мережі, за показником кількості невдалих з'єднань або обривів сеансів зв'язку. Велика кількість подібних інцидентів може вказувати на те, що да ділянці проведення тесту є можливі проблеми з ємністю, оскільки ресурсів мережі не вистачає для обслуговування всіх абонентів з дотриманням закладеного рівня якості.

- Налаштування параметрів (Parameter Tuning). До налаштування параметрів можна віднести керування ресурсами радіомережі та налаштування їх рівнів спрацювання (наприклад при хендовері). Основною складністю такого процесу є неоднорідність мережі та її відмінність між запланованою моделлю та дійсною. Мережеве планування використовує поправочні коефіцієнти, які можуть бути дійсними для однієї ділянки мережі та хибними для іншої. Подібні розбіжності можуть слугувати причиною для деградації основних показників KPI та зниженню загальної якості мережі.

- Якість. Якість мережі залежить від рівня її покриття, пропускної здатності і діапазону частоти. Більшість серйозних проблем, що пов'язані з якістю сигналу, можна пояснити зовнішнім втручанням на робочі діапазони стільників. Необхідно переглянути частотний план на проблемному місці та

з'ясувати відповідність завади до внутрішньої чи зовнішньої. До внутрішніх завад можна віднести помилкове розподілення частотного ресурсу, коли дві сусідні базові станції працюють в одному діапазоні й заважають один одному, або перекривання області сусіднього стільника, коли з непередбачуваних причин сигнал від однієї базової станції покриває більшу відстань, а ніж розраховувалось (наприклад, при віддзеркаленні від поверхні води), тим самим виходячи за межі кількох стільників і створюючи не оптимальні умови для користувачів.

- До зовнішніх завад відносять завади, які були викликані радіообладнанням, що працює в діапазоні частот базової станції, але є встановленими третіми особами без відому оператора. При наявності зовнішніх завад, їх джерело обов'язково повинне бути знайдене та знешкоджене.

4.2 Технологічні принципи забезпечення якості послуг, що передаються в мережах LTE

Антенна система відіграє важливу роль у мобільному зв'язку. Висота антени, нахили та азимути є сильними первинними факторами для формування покриття. Сам Нахил антени в основному впливає радіус покриття комірки та середнє значення SINR в зоні покриття, а оптимізація нахилу повинна враховувати баланс між радіочастотним покриттям та SINR.

Розглянемо таблицю співвідношення дальності покриття антеною від її кутів нахилу для базової станції висотою в 30 метрів, що зображена на рис. 4.2, та в таблиці 4.1.

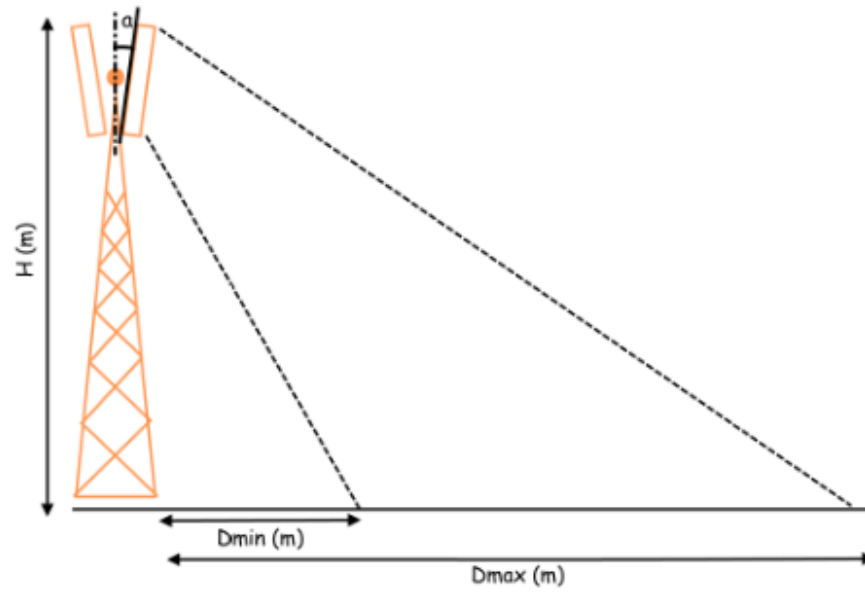


Рисунок 4.2 – Дальність покриття від кута нахилу антени

Таблиця 4.1 – Залежність дальності покриття від кута нахилу антени

| Кут нахилу (°) | D_{min} (m) | D_{max} (m) | Кут нахилу (°) | D_{min} (m) | D_{max} (m) |
|-------------------|------------------|------------------|----------------|------------------|------------------|
| 0 | 285 | ∞ | 10 | 105 | 429 |
| 1 | 244 | ∞ | 11 | 98 | 343 |
| 2 | 213 | ∞ | 12 | 92 | 285 |
| 3 | 189 | ∞ | 13 | 87 | 244 |
| 4 | 170 | ∞ | 14 | 82 | 213 |
| 5 | 154 | ∞ | 15 | 78 | 189 |
| 6 | 141 | ∞ | 16 | 74 | 170 |
| 7 | 130 | 1719 | 17 | 71 | 154 |
| 8 | 120 | 859 | 18 | 67 | 141 |
| 9 | 112 | 572 | 19 | 64 | 130 |

Окрім азимутів та кутів нахилу антен, спосіб розміщення антени також має великий вплив на спричинення завади іншим стільникам. Неправильне розміщення базової станції може мати істотний вплив на продуктивність її стільників. Найважливіша вимога антени базової станції повинні встановлені таким чином, щоб для основних променів не було перешкод.(рис. 4.3).

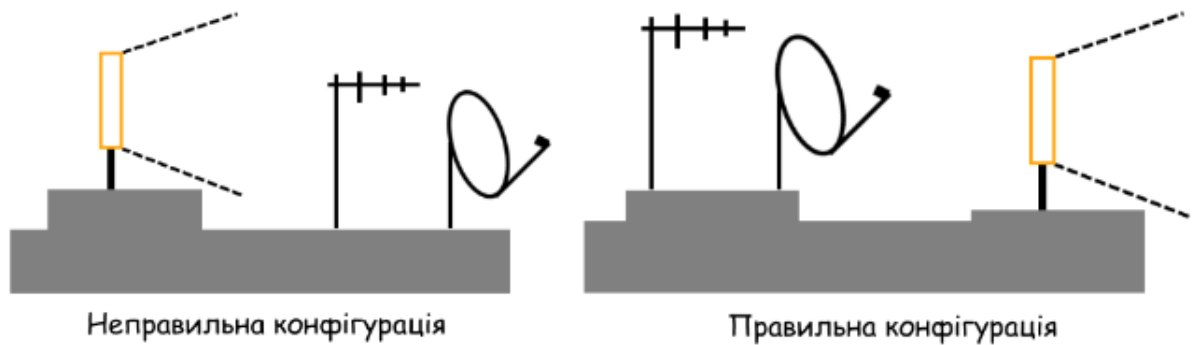


Рисунок – 4.3 Приклади правильної та неправильної конфігурації

На рисунку проілюстровано установка нової антени трохи вище і позаду вже існуючих антен. У такому випадку основному променю перешкоджають вже встановлені антени і його ефективність погіршується. Розглянемо приклад правильного встановлення – антена розташована перед і трохи нижче, аніж вже існуючі антени. У цьому випадку основний промінь антени не перешкоджає, хоча слід подбати про те, щоб антена не спричиняла перешкод для інших радіосистем. Існує також вимога забезпечення того, щоб край верхньої частини даху не спричиняв віддзеркалення основного сигналу. Якщо антена розміщена на краю верхньої частини даху, навряд чи це призведе до віддзеркалення. Однак, якщо положення антени буде відсунуте від краю, то, швидше за все, антена буде мати тінь. Антени, які розташовані подалі від краю, повинні встановлюватися зі збільшеною висотою. У більшості випадків антену встановлюють на відстані не менше 10 м від краю будівлі, і її запропонована висота повинна відповідати поділу відстані до краю на два. (рис 4.4)

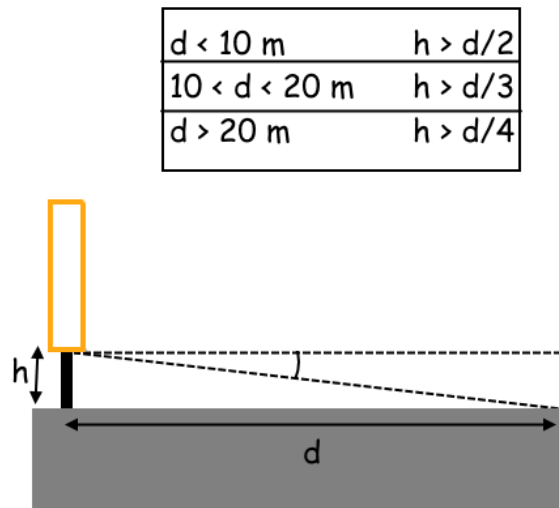


Рисунок – 4.4 Оптимальна висота антени

Що стосується антен, які встановлені на стінах, то азимут повинен бути налаштований так, щоб не порушувати основний промінь антени. Як правило, варто забезпечувати 15-градусний запас від стінок будівлі. Рисунок (номер) ілюструє принцип уникнення затінення від стін, на яких змонтовано антену(рис. 4.5).

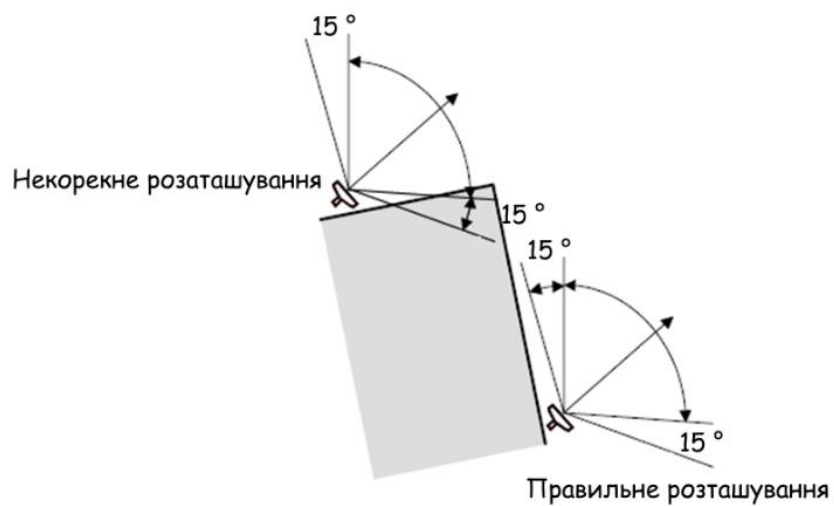


Рисунок 4.5 – Приклади правильного та не правильного азимуту

Віддалений електричний нахил антени. Нахил антени – це дуже потужний метод контролю ємності мережі та оптимізації її продуктивності. Нахил антени допомагає зосередити енергію в бажаному напрямку. Функція

дистанційного електричного нахилу (RET) дозволяє оператору контролювати та оптимізувати зону покриття, змінюючи нахил встановлених антен, без необхідності ручного підйому на щоглі. Блок RET може бути встановлений на будь-якій антені з можливістю нахилу, незалежно від збільшення висоти або діапазону.

Оптимізація рівня доступності (Accessibility). На графіку наведений приклад зниження доступності.



Рисунок – 4.6 Зниження доступності

Можливі причини:

- Недостатній рівень покриття. Необхідно перевірити відстань між сусідніми базовими станціями, і в залежності від цього прийняти рішення про зміну конфігурації.
- Перевірити якість покриття базової станції.
- Перевірити потужність кожного стільника. Змінюючи параметр мінімально допустимої якості сигналу з -120 дБм до -110 дБм, можна відсіяти велику кількість UE, що знаходяться на границі перетину стільників.
- Наявність будь-яких збоїв на базовій станції за минулий проміжок часу.

- Високе навантаження на Базову станцію. Необхідно перевірити кількість користувачів, перевірити стан інтерфейсу S1.
- Висока інтерференція.
- Конфлікт PCI. UE починає плутатися, якщо він отримує два або більше стільника з однаковим PCI. Колізія PCI відбувається, коли джерело і ціль мають однакові PCI.
- Показник доступності (Availability) повинен бути завжди 100%. Якщо значення менше 100%, це може вказувати на проблему з передачею даних, а також на те, що стільник не приймає трафік.
- Переглянути параметри вибору стільника, коли UE здійснює повторний вибір стільника. Неправильні пріоритети під час вибору стільника можуть вплинути на те, що UE встановить з'єднання з неправильною технологією.
- Значення VSWR більше зазначеної норми.

VSWR характеризує коефіцієнт напруги стоячої хвилі, цей показник вимірює, наскільки ефективно потужність сигналу передається через лінію передачі в антену. VSWR являється відношенням максимальної амплітуди піка до мінімальної амплітуди стоячої хвилі, яке в свою чергу розраховується через відношення максимальної напруги до мінімальної напруги протягом процесу передачі:

$$VSWR = \frac{V(max)}{V(min)}$$

Цей коефіцієнт вимірює потужність, яка відбивається назад від антени (рис. 4.7).

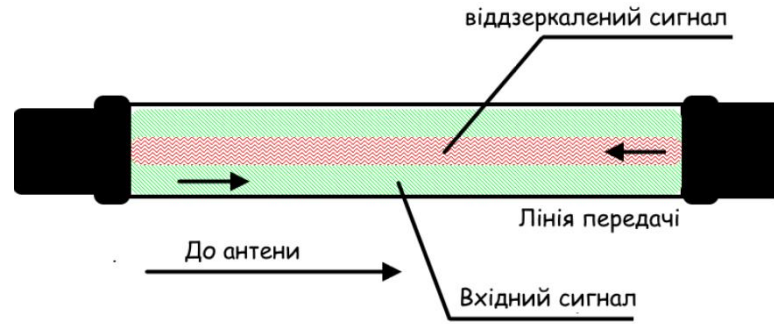


Рисунок – 4.7 Віддзеркалення потужності сигналу в тракті передачі

Втрата потужності в сигналі, що повертається, називається RL (Return loss) і розраховується у децибелах:

$$RL(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_i}{P_r},$$

де P_i – значення прямої потужності; P_r – відбитої.

Співвідношення між RL та VSWR визначається наступними формулами:

$$VSWR = \frac{1 + 10^{\frac{-RL}{20}}}{1 - 10^{\frac{-RL}{20}}};$$

$$RL = -20 \log_{10} \left[\frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \right].$$

Таблиця 4.2 – Відношення VSWR до сили відбитого сигналу

| VSWR | Return Loss (dB) | Reflected Power % |
|-------------|------------------|-------------------|
| 1:1 | ∞ | 0 |
| 1.1:1 | 26.44 | 0.228 |
| 1.2:1 | 20.83 | 0.816 |
| 1.3:1 | 17.69 | 1.71 |
| 1.4:1 | 15.56 | 2.78 |
| 1.5:1 | 13.98 | 4 |
| 1.6:1 | 12.74 | 5.5 |
| 1.7:1 | 11.73 | 6.8 |
| 1.8:1 | 10.88 | 8.2 |
| 1.9:1 | 10.16 | 9.6 |
| 2.0:1 | 9.54 | 11 |
| 3.0:1 | 6.02 | 24.9 |
| 4.0:1 | 4.44 | 69 |
| 5.0:1 | 3.52 | 44.4 |
| 6.0:1 | 2.92 | 50.8 |
| ∞ :1 | 0 | 100 |

Якщо підставити $VSWR = 1,5$ та $RL/20 = X$, можна отримати рівняння :

$$1.5 = \frac{(1 + 10^{-x})}{(1 - 10^{-x})} \rightarrow 1.5 = \frac{(10^x + 1)}{(10^x - 1)} \rightarrow 10^x + 1 = 1.5(10^x - 1) \rightarrow$$

$$2.5 = 0.5(10^x) \rightarrow 5 = 10^x \rightarrow X = \log_{10} 5 = 0.6989 \rightarrow RL = 20 * 0.6989 \\ = 13.979 \approx 14$$

Нормальним діапазоном значень для VSWR вважають від 1 до 1.5, якщо значення VSWR перевищує зазначений діапазон, то системою генерується збій.

Забезпечення Retainability.

- Retainability – спроможність мережі зберігати наявне з'єднання абонента з необхідними йому сервісами. Для перевірки з'єднань, на стороні базової станції використовують такі самі способи, що і при перевірці

доступності. Однак для забезпечення будь-яких сервісів для абонента, необхідний зв'язок з основною пакетною мережею, тому крім перевірки базових станцій необхідно також проводити перевірку ММЕ. На погіршення показників мережі можуть впливати:

- Збій при роботі з ядром мережі – в такому випадку всі стільники базової станції мають проблеми.
- Погана якість чи дефект обладнання (RRU, фідерних трактів, антен, тощо).
- Під'єднання елементів мережі у не відповідності із запланованою конфігурацією.

Оптимізація мобільності мережі. Мобільність RRC connected складається з основних окремих фаз:

- Зміна конфігурації.
- Звіт про зміни для рівнів потужності сигналу.
- Оцінка умов передачі.
- Виконання передачі.

В мережі LTE існують тільки hard handovers – це означає, що під час хендоверу, мережа повинна спочатку повністю розірвати наявне з'єднання, і тільки після цього відновити його, але вже на іншому стільнику для цього використовуються виміри UE якісних характеристик. Звіти про заміри можуть надсилатися як і в залежності спрацювання прапора, так і, взагалі, можуть бути повністю періодичними. Прапори та їх параметри контролюються мережею, наприклад: зміщення, гістерезис, час спрацювання, пороги. Від їх значень буде залежати, коли UE буде починати проводити виміри мережі. На рисунку 4.8 приведені різні порогові значення для спрацювання процесу вимірів, в залежності від рівня RSRP.

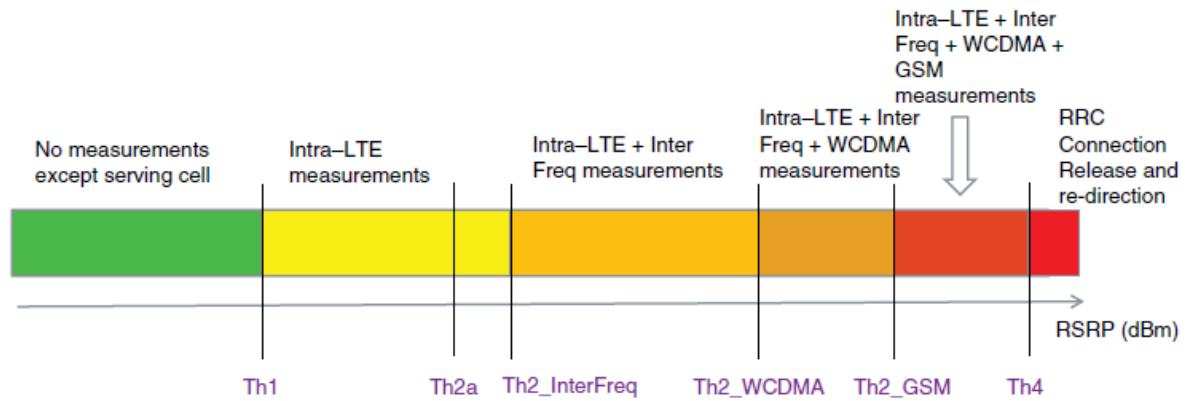


Рисунок 4.8 – Налаштування порогових значень

Метою такої структури є оптимізація та покращення процесу хендверу, оскільки під час роботи мережа експортується в різних радіоумовах та на різній місцевості. Використовуючи подібний процес хендверу, він буде відбуватися завжди однаково, опираючись тільки на значення встановлених рівнів спрацювання. На даному рисунку приведено основні рівні Th для спрацювання.

- При встановленому рівні Th1, UE не буде проводити ніяких замірів рівней RSRP. Це буде економити заряд батареї та не допустить несвоєчасних перемикань в гарних радіоумовах.
- При спрацюванні Th2, базова станція наддасть команду UE проводити періодичні виміри якості сигналу. Якщо відбудеться покращення рівня сигналу від обслуговуючої станції $> Th2$, то процес виміру зупиняться. Варто додати, що при від встановленого значення Th2, ми можемо налаштувати час спрацювання між подіями Th1 та Th2.
- Якщо UE не знаходить сусідніх стільників, які відповідають радіоумовам, базова станція ініціює процес роз'єднання.
- Коректне налаштування порогів та таймерів хендверів забезпечує мережу від перенавантаження та знижує службовий трафік.

Правильна конфігурація потужності стільників зменшує завади та знижує споживання електроенергії. Це призводить до збільшення ємності стільника та максимальної швидкості передачі даних для UE. Крім того,

правильне налаштування потужності допомагає збільшити час автономної роботи базової станції та зменшити енергетичні затрати під час використання мобільної мережі для мобільного пристрою користувача, продовживши час його роботи. Однак, для якісної роботи мережі LTE, необхідні не тільки хороші рівні RSRP, але й високий показник між перешкодами та хороший показник рівня шуму (SINR). Якщо PCI не планується некоректним – з суттєвими помилками, це може викликати часті переривання опорного сигналу (RS), що може призвести до втрати абонентом рівня покриття. Будучи інформаційним опорний сигналом, він використовується UE для оцінки каналу та для повідомлень від eNB про його якісні показники CQI.

Фізичний ідентифікатор Physical Cell ID є одним з найважливіших ідентифікаторів стільника в бездротовій мережі системи LTE – його правильне планування є важливим кроком для побудови мережі LTE. Правильне використання PCI дозволяє підвищити ефективність використання ресурсів та QoS систем в LTE для кінцевих користувачів, так само як і його невдале планування знижує продуктивність окремого стільника та мережі загалом.

PCI – це фізичний ідентифікатор в мережі LTE, який надає можливість для унікальної ідентифікації, завдяки чому можливі різні стільники в самій мережі LTE. Він складається з двох компонентів: сигналу первинної синхронізації PSS та сигналу вторинної синхронізації SSS. (рис. 4.9)

Розглянемо більш детально складові цих двох сигналів:

- Primary Synchronization Signal (PSS) – сигнал, який необхідний для синхронізації TTI, слотам та OFDM символів між базовою станцією та UE. Його передача відбувається в слотах з індексами 0 та 10 кожного субкадру, або 0 та 5 TTL, чи у кінці 7-го OFDM символу. Таким чином, сигнал PSS передається двічі за 10 мс, і приймає значення в діапазоні від 0 до 2 для визначення часу субкадру.

- Secondary Synchronization Signal (SSS) – сигнал, що передається в слотах 0 та 10, як і PSS символи. Приймаючи сигнал SSS, UE абонента може

визначити групу ідентифікаторів стільника, котрі можуть приймати значення від 0 до 167.

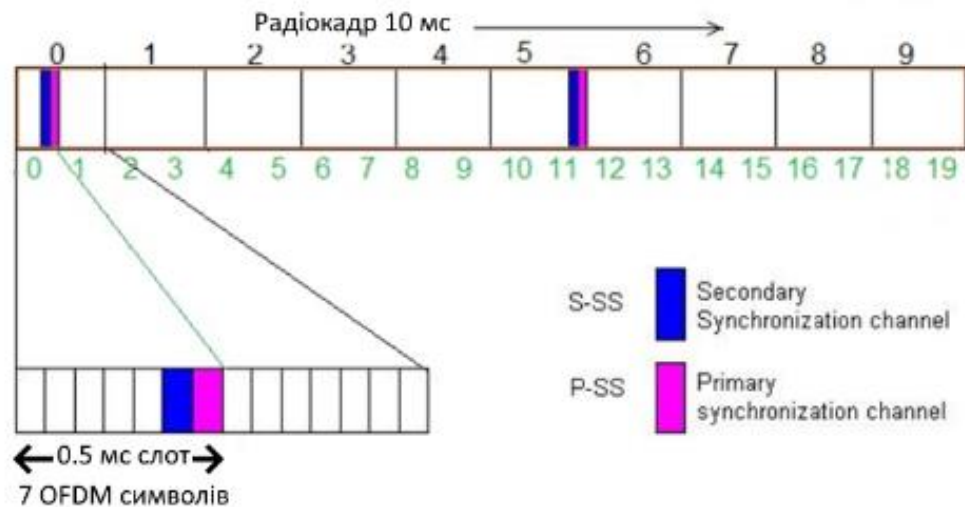


Рисунок 4.9 – Індеси SSS та PSS

Для розрахунку можливого діапазону PCI, використовують наступну формулу:

$$PCI = 3 * SSS + PSS.$$

$$PCI = 3 * 167 + 3,$$

$$PCI = 504.$$

- В даній формулі ми множимо SSS на 3, оскільки базова станція має три стільника, котрі розташовані через 120° один від одного для рівномірного покриття площі: $360^\circ / 120^\circ = 3$. Така конфігурація вважається стандартною для базової станції, тому і була використана для підрахунків.
- Оскільки PSS може приймати тільки значення 0, 1, 2 – це означає, що можливі три різні конфігурації, що ми і використали у формулі.
- Отримуємо, що PCI може приймати значення від 0 до 503, всього 504.

Приклад розрахунку реального PCI на базі SSS та PSS (рис. 4.10):

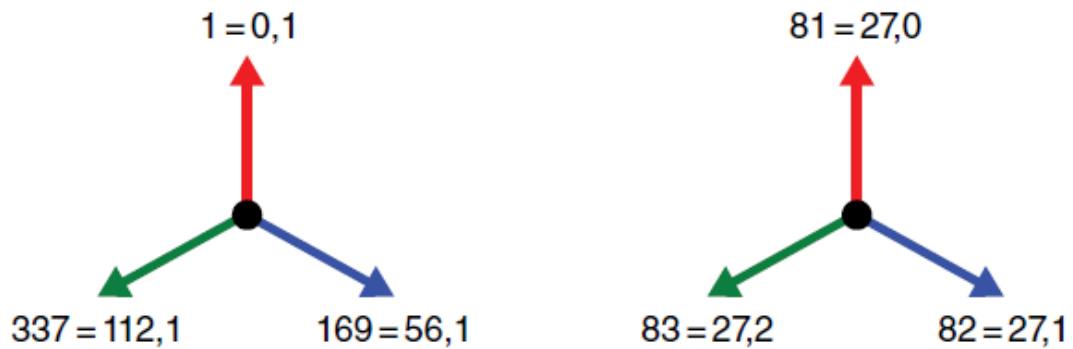


Рисунок – 4.10 Приклад індексів PCI на стільниках базової станції

Основна мета оптимізації PCI полягає у тому, щоб забезпечити різні значення PCI для сусідніх стільників мережі. Для створення початкового плану використовують різні програми, які враховують конфлікти зіткнення різних PCI і дозволяють без проблем використовувати їх повторно на деякому віддаленні один від одного. Однак мобільна мережа постійно розвивається шляхом інтеграції нових базових станцій, тому необхідно перепланувати сценарій використання PCI (рис.4.11).

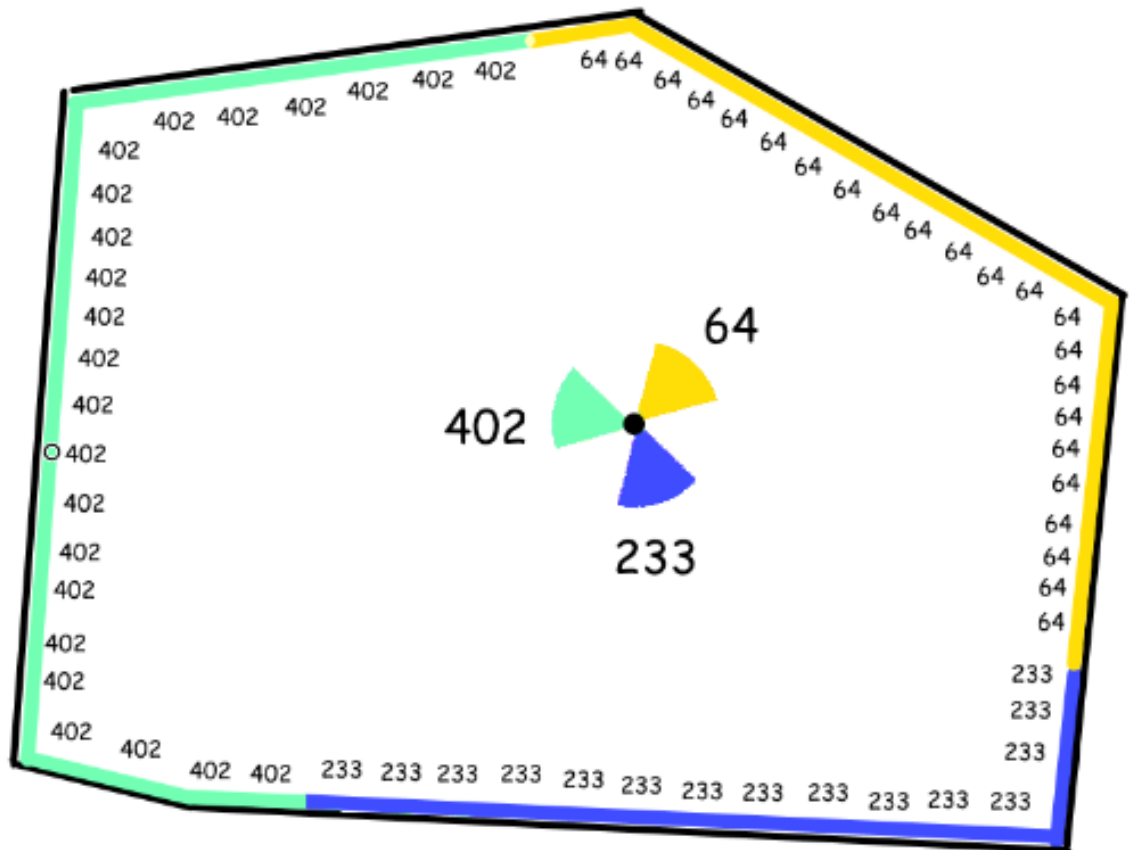


Рисунок 4.11 – Розподілення індексів PCI на площі

Якщо мобільна станція користувача зафіксує однакові PCI ідентифікатори з різних базових станцій, це спричиняє плутанину у під час вибору необхідної базової станції. Якщо вибір виявиться хибним, то мобільний пристрій починає передавати дані на базову станцію, яка не є оптимальною для нього – зазвичай така базова станція знаходиться на великому віддаленні від користувача і має дуже низьку якість каналу. Зрозуміло, що в такому випадку якість сервісів буде найнижча і будуть часті затримки та обриви під час сеансу зв'язку. Подібні фактори суттєво знижують ефективність роботи самої мережі, крім того передача повідомлення на велику відстань буде вимагати більші енергетичні затрати.

Приклад розподілення індексів PCI на чотири групи і використання їх на різних ділянках мережі (рис. 4.12-4.13)

| Група 1 | Група 2 | Група 3 | Група 4 |
|---------|---------|---------|---------|
| 0 | 126 | 252 | 378 |
| 1 | 127 | 253 | 379 |
| 2 | 128 | 254 | 380 |
| 3 | 129 | 255 | 381 |
| 4 | 130 | 256 | 382 |
| 5 | 131 | 257 | 383 |
| 6 | 132 | 258 | 384 |
| 7 | 133 | 259 | 385 |
| 8 | 134 | 260 | 386 |
| 9 | 135 | 261 | 387 |

| | 24 | 501 | 5 |
|-----|-----|-----|-----|
| 116 | 242 | 368 | 494 |
| 117 | 243 | 369 | 495 |
| 118 | 244 | 370 | 496 |
| 119 | 245 | 371 | 497 |
| 120 | 246 | 372 | 498 |
| 121 | 247 | 373 | 499 |
| 122 | 248 | 374 | 500 |
| 123 | 249 | 375 | 501 |
| 124 | 250 | 376 | 502 |
| 125 | 251 | 377 | 503 |

Зарезервовано

Рисунок 4.12 – Розбиття РСІ на групи

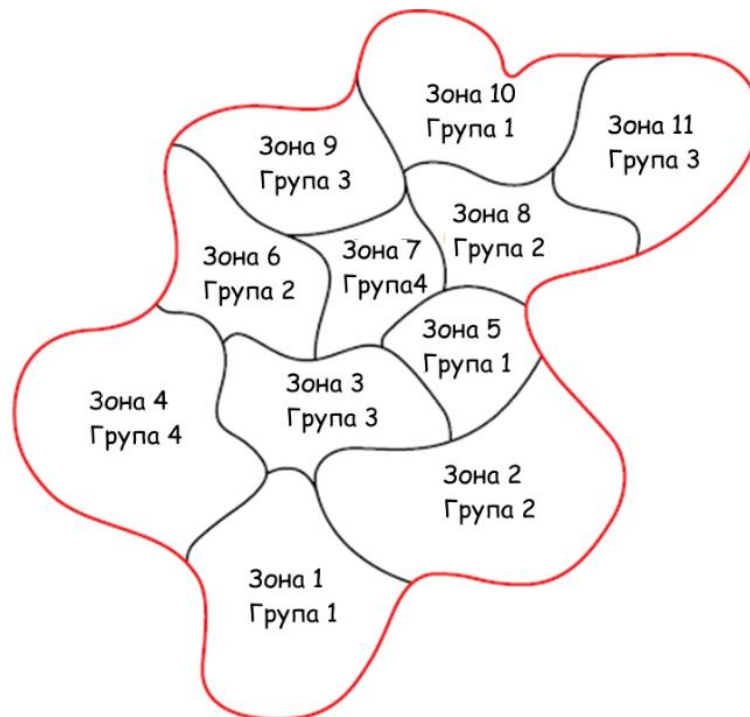


Рисунок 4.13 – Групи РСІ

Виходячи з вимог до PCI, зрозуміло, що під час планування мережі необхідно закласти запас між значенням PCI базових станцій – для того, щоб у майбутньому була можливість інтегрувати нові базові станції.

- Алгоритм перевірки PCI та оптимізації:
- Перевірити, що ні один сусідній стільник не має таке саме значення PCI, як і у стільника, що перевіряється.
- Перевірити значення всіх судніх PCI на можливий конфлікт між собою.
- Перевірити, наскільки далеко використовується таке саме значення PCI, як і на стільнику, що налаштовується і чи задовольняє дана відстань вимогам.
 - На краю стільника A: ($RSRP_{cellA} \leq -115$ дБм), $RSRP_{cellA} \geq RSRP_{cellB} + 10$ дБ.
 - На краю стільника B: ($RSRP_{cellB} \leq -115$ дБм) $RSRP_{cellB} \geq RSRP_{cellA} + 10$ дБ. Коли рівень сигналу сусіднього стільника є нижчим від обслуговуючого на 10дБ, то обслуговуючий стільник має низьку ефективність.
- Проблема обслуговування базової станції користувачів поза розрахунковою зоною покриття.

Коли реальне покриття від одної базової станції перевищує заплановане, відбувається накладення покриття від двох різних стільників в межах деякої площі. Подібні випадки відбуваються, коли розрахункова конфігурація антен базової станції не відповідає реальній. Для розрахунку приблизного покриття використовують різні програмні продукти (рис.4.14), одне з таких рішень – Forsk Atoll .

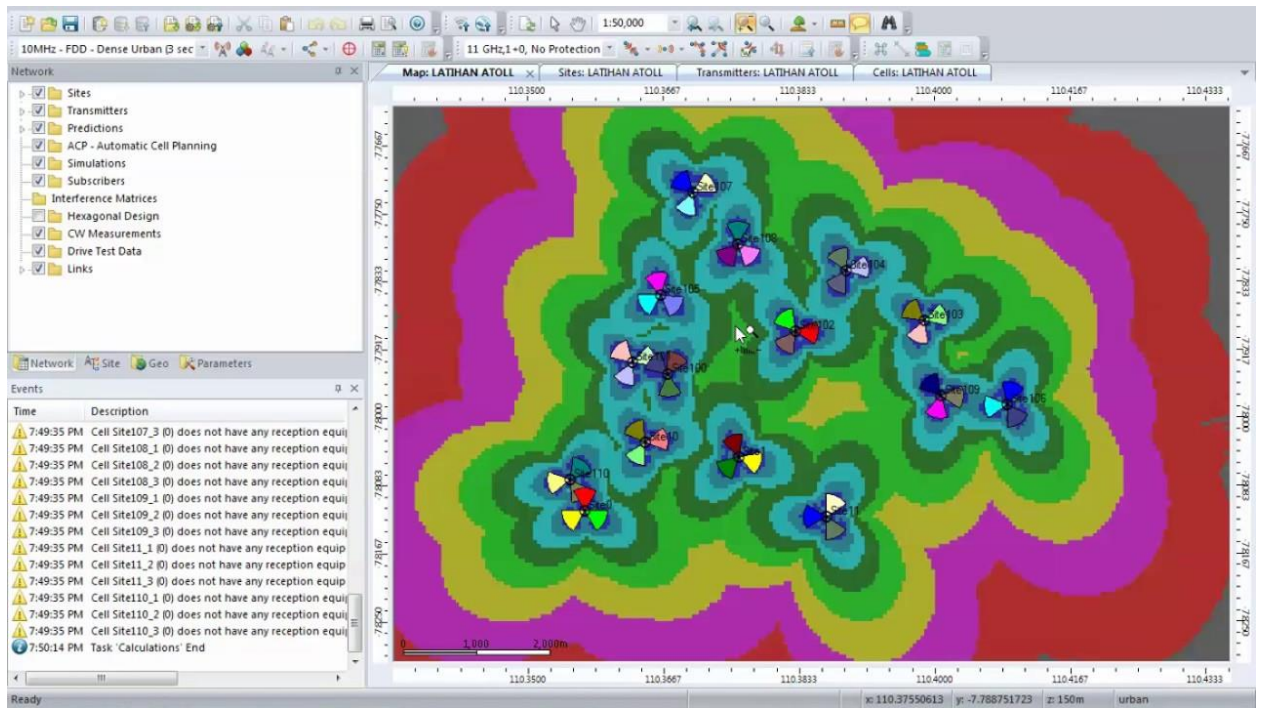


Рисунок 4.14 – Приклад розрахунку покриття в програмі Forsk Atoll

Захоплення абонента поза зоною покриття супроводжується низькою якістю каналу, що в першу чергу впливає на зменшення швидкості передачі інформації та збільшення кількості обривів в сеансі зв'язку. Подібні випадки, зазвичай, точно ідентифікуються під час драйв-тесту.

- Для виправлення такої проблеми використовують наступні дії:
- Перевірка поточної висоти розташування антени.
- Перевірка механічних кутів нахилу антени.
- Калібрування та встановлення правильних електричних кутів – у тому випадку, якщо на базовій станції встановлено відповідне обладнання (RET - Remote Electrical Tilt).
- Зниження потужності стільника (від 1 до 3 дБ).
- В залежності від ландшафту, зміна кутів азимуту антени.

Варто додати, що ландшафт грає основну роль під час розрахунку покриття, і його зміна (у випадку побудови чи знесення будинків в місті) може сильно вплинути на покриття стільників. Тому для ефективного контролю покриття стільників, необхідно відстежувати його за допомогою

окремих програм і вносити коректуючи дії для забезпечення оптимальних показників.

4.3 Висновку до розділу 4

Під час розгляду четвертого розділу було визначено основну мету проведення оптимізаційних заходів. Неможливо проводити оптимізацію мережі без проведення початкового аналізу та оцінки її стану. Будь-які дії з мережею повинні бути обґрунтовані та заздалегідь заплановані. В даному розділі були зазначені проблеми, які спричиняють погіршення показників KPI, та способи їх оцінки, для ідентифікації першопричини збою чи поламки.

Із опису теми стає зрозумілим, що оптимізація – це нескінченний циклічний процес, який спрямований на покращення характеристик мережі та налаштування її в залежності від реальних умов експлуатації.

Також були розглянуті основні проблеми ідентифікації стільників за допомогою RSI індексів. Некоректне налаштування системи розпізнавання різних стільників може призвести до неоптимального з'єднання між мобільною станцією абонента та базовою станцією оператора. Встановлений сеанс зв'язку в подібних умовах буде мати низьку якість каналу, що в свою чергу знизить загальний рівень QoE для користувача. Окрім того, такі проблеми зашкодять показникам KPI та загальній статистиці мережі. Тільки після коректного налаштування RSI та виправлення проблеми захоплення абонентів поза розрахунковою зоною покриття, можливо домогтися рівномірного навантаження на мережу, а також її максимальної продуктивності роботи у поєднанні із загальною оптимізацією. Подібні дії гарантують, що мережа буде надійно функціонувати та надавати якісні послуги всім користувачам, незалежно від їх місцезнаходження.

ВИСНОВКИ

Мережа LTE суттєво відрізняється від мереж минулого покоління завдяки використанню принципу All IP

Network, що дозволяє повністю відмовитися від комутації голосових каналів. Функціонал оновленої архітектури дозволяє використовувати більш ефективні способи управління мережею, а саме алгоритми автоматичної конфігурації та автоматичної оптимізації. Система автоматичної конфігурації мережі дозволяє самостійно встановлювати з'єднання з новими базовими станціями, за допомогою вже працюючих сусідніх базових станцій. Процес автоматичної оптимізації базується на раціональному розподілі ресурсів мережі, використовуючи вільні канали сусідніх базових станцій. Подібні заходи дозволяють спростити експлуатацію та налаштування мережі для оператора мобільного зв'язку.

Розглядаючи питання якості надання послуг в мережі LTE, були відзначені основні критерії QoS і QoE, та їх складові. Ватро відзначити, що критерій оцінки QoE формується в залежності від сприйняття абонентом загальної якості послуги. Для визначення QoE використовують фіксовані значення QoS, а також людський фактор відчуття якості послуг мережі. Для характеристики та оцінки продуктивності мобільної мережі використовують показники KPI – за допомогою них можливо проводити якісний моніторинг мобільної мережі в режимі онлайн.

У розділі забезпечені якості послуг було розглянуто оптимізацію як нескінченний циклічний процес, який спрямований на покращення характеристик мережі та налаштування її в залежності від реальних умов експлуатації. Також були відзначені рекомендовані показники для підвищення ефективності роботи мережі загалом.

В роботі представлено різні способи підвищення якості мобільної мережі за допомогою автоматичних систем та під час налаштування

параметрів мережі оператором. Основним інструментом, що дозволяє оператору виявляти проблеми в мережі в хронології, є аналізування статистичних показників KPI. При налаштуванні мережі оператором використовуються різні способи, основними з яких є: корегування фізичної конфігурації, оптимізація хендверів, пошук конфліктів PCI індексів та їх усунення.

Подальші дослідження будуть спрямовані на більш детальне опрацювання процесу оптимізації, з можливістю у майбутньому інтегрувати його в автоматичну систему самооптимізації мережі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. А.Е. Рыжков, М.А. Сиверс, В.О. Воробьёв, А.С. Гусаров, А.С. Слышков, Р.В. Шуньков Системы и сети радиодоступа – СПб: Линк, 2012. – 226 с.: ил.
2. LTE Optimization Engineering Handbook – Xincheng Zhang, 2018 – 844 с.
3. 3GPP LTE Radio layer 2, 2010 – 44 с.
4. Рекомендация МСЭ-Т G.107 2015 –30с.
5. 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband Erik Dahlman – Stefan Parkvall, and Johan Sköld, 2011–447с.
6. 3GPP TS 36.213 version 12.3.0 Release 12
7. Self-Organizing Networks (SON) in 3GPP Long Term Evolution Sujuan Feng, Eiko Seidel Nomor Research GmbH, Munich, Germany 20th of May 2008 – 15с.
8. Г.Ю. Бишовець – Використання технології частотно-ортогонального Мультиплексування в LTE.
9. LTE signaling, Troubleshooting, And optimization – Ralf Kreher and Karsten Gaenger 2011 – 296с.
10. Transmission Techniques for 4G Systems – Mário Marques da Silva, Américo M. C. Correia, Rui Dinis, Nuno Souto, and João Carlos Silva 2015-337с.
11. EPC and 4G Packet Networks: Driving the Mobile Broadband Revolution 2012 – 624с.
12. Design, Deployment and Performance of 4G-LTE Networks: A Practical Approach 2014 – 587с.
13. Heterogeneous Networks in LTE-Advanced – Joydeep Acharya, Long Gao, Sudhanshu Gaur 2014 - 296с.
14. 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband – Stefan Parkvall, Johan Skold 2011 – 481с.